



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Feliks Sirkas**

**KULTUURIDE HOOLDUSE JA VALGUSTUSRAIE  
VAJADUSE HINDAMINE AEROLIDARI ANDMETE  
PÕHJAL**

ESTIMATION OF CLEANING AND PRECOMMERCIAL  
THINNING NECESSITY USING AIRBORNE LASER  
SCANNING DATA

Magistritöö  
Metsamajanduse õppekava

Juhendaja: dotsent Mait Lang, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Feliks Sirkas		Õppekava: Metsamajandus	
Pealkiri: kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamine aerolidari andmete põhjal			
Lehekülgi: 55	Jooniseid: 12	Tabeleid: 8	Lisasid: 5
Õppetool: Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: B430 Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia, T181 Kaugseire			
Juhendaja: Mait Lang			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021			
<p>Kultuuride hoolduse ja valgustusraiega parandatakse puude valgus- ja toitetingimusi ning suurendatakse puistu majanduslikku tasuvust. Üks võimalus kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamiseks on kasutada aerolaserskaneerimise (ALS – <i>Airborne laser scanning</i>) tulemusel saadud punktipilve andmeid. Magistritöö eesmärgiks on uurida kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamise võimalusi pungade puhkemise eel tehtud madala punktihedusega ALS andmete põhjal.</p>			
<p>Vaadeldud eraldistel oli kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus suurem kui enamik lidari emiteeritud impulsse registreeriti maapinnalt või punktipilve kõrguste keskvaartusest madalamal. Maapinnale jõuab suurem osa peegeldusi varakevadelisel ALS mõõdistuslennul enne vegetatsiooniperioodi, mil lehtpuudel pole lehti ning rohttaimestik praktiliselt puudub. Kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus on enim seotud (<math>r = 0,63</math>) ALS meetrikuga <math>H_{cv}</math> ehk punktipilve kõrguste variatsioonikoefitsiendiga. Valiti välja 24 sisukat ALS meetrikut ning logistilise regressioonanalüüsi meetodil koostati 12 mudelit. Mudelite testimiseks kasutati RMK 2020. aastal tehtud ning 2021. aastaks planeeritud kultuuride hoolduste ja valgustusraiate andmeid, kokku 450 eraldist. Paremaks osutusid kolm mudelit, mis sisaldasid kaks kuni kolm ALS meetriku elementi. Mudelite rakendamine RMK testandmestikul näitas, et seosed kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse ning ALS meetrikute vahel on olemas. Mudelid prognoosisid enamikule RMK eraldistele suurt hooldusraie vajadust ning väiksemat hooldusraie vajadust prognoositi eraldistele, kus kultuuride hooldus ja valgustusraie oli ALS mõõdistuslennu ajaks juba tehtud.</p>			
<p>Seoste uurimist tasub tulevikus jätkata, seejuures on soovitatav kasutada vegetatsiooniperioodil tehtud ALS mõõdistuslennu andmeid. Praktikas rakendatavate mudelite koostamiseks on vaja suuremat alusandmestikku ning valideerimisandmestik peab sisaldama nii hooldusraiet vajavaid kui mittevajavaid eraldisi. Tulevastel uuringutel võib seoste otsimisel kasutada ka otsustuspuu meetodit.</p>			
Märksõnad: aerolaserskaneerimine, noorendiku hooldus, metsakorraldus, kaugseire			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Author: Feliks Sirkas		Curriculum: Forestry management	
Title: estimation of cleaning and precommercial thinning necessity using airborne laser scanning data			
Pages: 55	Figures: 12	Tables: 8	Appendixes: 5
Chair: Forest Management Planning and Wood Processing Technologies			
Field of research and (CERC S) code: B430 Silviculture, forestry, forestry technology, T181 Remote sensing			
Supervisor: Mait Lang			
Place and date: Tartu, 2021			
<p>Cleaning and precommercial thinning are necessary for improving the light and nutrition conditions within the remaining stand which in turn increases the economic value of a forest stand. One possibility to evaluate the necessity of cleaning and precommercial thinning of a stand is to use the data obtained from airborne laser scanning (ALS). The aim of this master's thesis is to find different possibilities of evaluating the necessity of cleaning and precommercial thinning within a stand based on low point density ALS data.</p> <p>The necessity of cleaning and precommercial thinning of the observed forest stands increased when the majority of pulse returns are registered from the ground. Majority of pulse returns are reflected from the ground during ALS which takes place in early spring before the vegetation period. The necessity of cleaning and precommercial thinning is strongly correlated (<math>r = 0,63</math>) with point cloud metric <math>H_{Cv}</math> (coefficient of variation of the point cloud heights). 24 informative point cloud metrics were chosen and by using logistic regression method 12 models were constructed. The validation of the models was based on data from Estonian State Forest Management Centre (RMK) – cleaning and precommercial thinning treatment done in 2020 and treatment plans for 2021 (450 forest stand compartments). Better models consisted of two to three ALS point cloud metric elements. Model validation showed that there is a correlation between ALS data and the necessity of cleaning and precommercial thinning. The models predicted higher need for the cleaning and precommercial thinning treatment for most of the forest stand compartments of RMK and less of a need for a treatment in those forest stand compartments where the treatment was done before ALS flight.</p> <p>For the further research it is recommended to use ALS data observed during the vegetation period. For practical models it is necessary to obtain more observations and the data must include forest stands with and without the necessity of cleaning and precommercial thinning. The decision tree method can be used to find the correlation between ALS data and the necessity of cleaning and precommercial thinning.</p>			
Keywords: weeding of plantations, tending, forest planning, remote sensing			

# SISUKORD

LÜHENDITE LOETELU .....	5
SISSEJUHATUS.....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	8
1.1. Metsa uuendamine ja taimestiku muutused .....	8
1.2. Valgustusraie .....	9
1.3. Aerolaserskaneerimine ja lidariandmete olemus ning töötlemine .....	10
1.4. ALS andmete ja takseertunnuste seosed.....	13
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	15
2.1. Alusandmed .....	15
2.2. Lidariandmete töötlemine.....	17
2.3. Mudelite koostamine .....	19
3. TULEMUSED .....	26
3.1. Mudelite testimine RMK andmestikul .....	26
4. ARUTELU.....	32
KOKKUVÕTE .....	36
KASUTATUD KIRJANDUS .....	38
LISAD .....	41
Lisa 1. Pildid vaadeldud eraldistest.....	42
Lisa 2. Vaadeldud eraldiste vaatlusandmed, vajalike tööde kirjeldused ning lisatud binaarsed tunnused üks ja null .....	48
Lisa 3. Vaadeldud eraldiste ALS meetrikute korrelatsioonid kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadusega .....	50
Lisa 4. Vaadeldud eraldiste ALS meetrikute statistilised näitajad .....	51
Lisa 5. Mudel <sub>2</sub> , mudel <sub>4</sub> ja mudel <sub>5</sub> hooldusraie vajaduse prognooside ja ALS meetrikute seoste graafikud RMK 2021. aasta andmete põhjal.....	52

## LÜHENDITE LOETELU

AIC	<i>Akaike's information criterion</i> , Akaike informatsioonikriteerium
ALS	<i>airborne laser scanning</i> , aerolaserskaneerimine
AUC	<i>area under the curve</i> , ROC-kõvera alune pindala
DTM	<i>digital terrain model</i> , maapinna kõrgusmudel
GLM	<i>general linear model</i> , üldine lineaarne mudel
GNSS	<i>global navigation satellite system</i> , globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
GPS	<i>global positioning system</i> , globaalne positsioneerimissüsteem
IMU	<i>inertial measurement unit</i> , lennuki asendiandur
LiDAR	<i>light detection and ranging</i>
$R^2_m$	Mcfaddeni pseudo-determinatsioonikordaja
RMK	Riigimetsa Majandamise Keskus
ROC	<i>receiver operating characteristic curve</i> , mudeli suhtelise toimimise karakteristikute kõver

## SISSEJUHATUS

Eesti riigimetsadesse istutati 2020. aastal 8700 hektarile kokku 22,4 miljonit taime (RMK 2020). SA Erametsakeskuse 2020. aasta esimeses toetusvoorus taotlesid erametsaomanikud taimede istutamiseks toetust 2844 hektarile ja 4,7 miljoni taime soetamiseks (SA Erametsakeskus 2020). Rajatud metsakultuuridest soovitud liigilise koosseisuga puistu kasvatamiseks tuleb istutatud või külvatud aladel teha kultuuride hooldust ja hilisemalt hooldusraieid, millest valgustusraie on okaspuunoorendiku arengus kõige olulisem. Valgustusraiega parandatakse noorendikus kasvavate puude valgus- ja toitetingimusi ning reguleeritakse liigilist koosseisu (Laas 2015). Õigeaegselt tehtud valgustusraie vähendab metsamajandamise kulusid ja suurendab puistu majanduslikku tasuvust (Metsanduse programmi... 2020). Esimeste hooldusraiete vajadust hinnatakse metsakasvataja poolt arvestades puistu koosseisu, tihedust ja kõrgust ning rohurinde olemasolu ja selle kõrgust. Kirjeldatud kohapealne hindamine on sõltuvalt metsakultuuri või noorendiku asukohast tavaliselt ajakulukas.

Üks võimalus esimeste hooldusraiete vajaduse hindamiseks on analüüsida aerolaserskaneerimise (ALS – *Airborne laser scanning*) tulemusel saadud punktipilve andmeid, mis sisaldavad teavet taimkatte kõrguse ja tiheduse kohta. ALS põhineb õhusõidukile asetatud lidariseadmest, mis saadab välja laserimpulsse ja registreerib peegelduste asukohakoordinaadid. Tulemuseks on kolmemõõtmeline punktipilv. ALS võimaldab koguda kõrgusandmeid lühikese aja jooksul suure ala kohta (Heritage, Large 2009, Kasischke jt 2004). Andmetööstustarkvaradega koostatakse lidariandmetest statistikud, mille edasisel töötlemisel saab arvutada mitmeid puistu takseertunnuseid (Arumäe 2020).

Magistritöö eesmärk on uurida kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamise võimalusi aerolidari andmestiku põhjal. ALS ja välivaatluste andmete alusel koostatakse mudelid, mille abil saab prognoosida kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadust. Esmalt tehakse ülevaade metsa uuenemisest ja sellega seotud muutustest metsas peale raieid,

seejärel kirjeldatakse aerolaserskaneerimist, lidariandmeid ning nende töötlemise võtteid. Väливаatlustel uuriti raiejärgseid alasid, okaspuukultuure ja -noorendikke. Koguti andmeanalüüsi jaoks vajalikud tunnused, mille alusel koostati ALS-põhised mudelid. Magistritöös kirjeldatakse mudelite koostamise protseduuri, esitatakse nende rakendamise tulemused ja antakse soovitusel tulevaste uuringute tarbeks.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Metsa uuendamine ja taimestiku muutused

Uuendusraieid tehakse metsa uuendamise või uuenemise võimaldamiseks (Metsaseadus prg 28 lg 6). Uuendusraiate hulka kuuluvad lage- ja turberaie (Metsaseadus prg 28 lg 4). Käesoleva magistritöö raames on vaatluse all uuenevad ja uuendatud alad, kus eelnevalt oli teostatud lageraie. Lageraie järgselt on metsaomanik kohustatud rakendama metsa uuendamise võtteid, mis hiljemalt viis aastat peale uuendusraiet tagavad uuenenud metsa (Metsaseadus prg 24 lg 3). Metsa uuendamise võtted on maapinna ettevalmistamine, puuseemnete külvamine, puude istutamine, metsakultuuri hooldamine ja loodusliku uuenduse tekke ning arengu soodustamine (Metsaseadus prg 24 lg 2). Peale lageraiet okaspuuenamusega puistutes viljakal kasvukohal algab looduslikult puuliikide vaheldus, kus okaspuuliigid asenduvad lehtpuu liikidega. Kiirekasvulised pehmelehtpuuliigid on hästi kohastunud lageda ala keskkonnatingimustega ning valgustingimuste ja temperatuurikõikumiste suhtes tundlikumad okaspuuliigid jäävad konkurentsilehtpuudega ja rohuringega alla. Metsamajanduse üks olulisemaid ülesandeid on uuendusraietega või loodushäiringute tekitatud alade kiire ja tõhus kultiveerimine sobivate puuliikidega, et moodustada uus tootlikum metsapõlv (Laas jt 2011). Metsakultiveerimisega raiesmike uuendamata jätmine pikendab raieringi ja tekkiv looduslik uuendus ei pruugi metsaomaniku metsakasvatuseesmärkidega sobida (Laas 2001). Kultiveeritud aladel tuleb istutatud või külvatud peapuuliigi taimede noorendikuks väljakasvatamiseks teostada metsakultuuride ja uuenduse hooldust, mille eesmärk on peapuuliigi puudele soodsate kasvutingimuste säilitamine. Kultuuride hooldusega reguleeritakse puistukoosseisu ning tõrjutakse rohuringe ja väheväärtuslike puuliikide kasvu. Okaspuukultuuride puude kasv sõltub paljudest teguritest: puhma- ja rohuringe tihedus ja kõrgus, lehtpuude tihedus ja kõrgus, kultuuride hooldamine või hooldamatus, kahjurite hulk, sademete hulk jpm. Metsakultuuride ja noorendike peamised kasvu piiravad mõjud mööduvad 10-25 aasta vanuses puistus, mil



puude võrad on liitunud ning misjärel mõjutab puude kasvu peamiselt kasvukoha mulla tüüp ja niiskus ning puistu tihedus (Laas jt 2011).

## **1.2. Valgustusraie**

Valgustusraie ehk noorendike hooldus kuulub hooldusraiete hulka ja selle eesmärk on parandada puude valgus- ja toitetingimusi ning kujundada liigilist koosseisu noorendikes ja latimetsas, kus keskmine rinnasdiameeter on kuni kaheksa sentimeetrit (Laas 2015, Metsaseadus prg 28 lg 7.1 ja 4.2). Valgustusraie on metsakultuuride ja uuenduse hooldamiste jätkuks ja seda tehakse metsaks uuenenud aladel suve teisel poolel või sügisel enne lehtede maha varisemist umbes viie aastaste vahedega vähemalt kaks korda (Laas 2015). Esimesel korral eemaldatakse noorendikest mittevajalikud ja peapuuliigi kasvu takistavad puud. Teisel raiel jätkatakse puuliigilise koosseisu kujundamist ja harvendatakse peapuuliigi elementi. Valgustusraiega antakse järelejäävatele puudele avaram kasvuruum, misjärel suureneb fotosünteesiv lehemass ühe puu kohta ning seda vee ja mineraaltoitainetega varustav juurestik, mille tulemusel suurenevad kiiremini tüvede mõõtmed (Laas jt 2011). Õigeaegne valgustusraie parandab majanduslikku tasuvust ja võimaldab teha esimest harvendusraiet kolm kuni neli aastat varem (Metsanduse programmi... 2020).

Valgustusraiet vajavad eelkõige valgusnõudlike puuliikide noorendikud, mille puude võrade mõõtmed vähenevad tiheda asetuse korral kiiresti tugeva külgvarju tõttu. Samuti on valgustusraiet vaja okaspuukultuurides, kuhu tekivad kiirekasvulised lehtpuud, ja viljakate kasvukohtade (IA kuni II boniteediklassi) noorendikes, kus puude mõõtmed suurenevad kiiresti ning tihedas konkurentsivahelise väheneb võrade pikkus (Laas 2015).

Valgustusraiet tehakse noorendikes, kus võrastiku liitus (võrastiku projektsiooni suhe puistu pindalasse) on rohkem kui 0,9-1,0, mis viiakse raiega liituseni 0,7. Noorendike võrastiku liitus määratakse võradevahelisi vahemikke või nende puudumist arvestades (Vaus 2005, Laas jt 2011). Männikülvikultuurides on esimene valgustusraie vajalik alla ühe meetrise keskmise kõrguse noorendiku puhul, istutuskultuuris peab valgustusraie tegema kui peapuuliigi keskmine kõrgus on üks kuni kaks meetrit. Männinoorendiku esimese valgustusraie võib vähese lehtpuuliikide uuenduse puhul edasi lükata kuni puistu on saavutanud kahe kuni kolme meetrise kõrguse. Männinoorendikus tehakse teine

valgustusraie kui peapuuliigi keskmine kõrgus on kolm kuni kuus meetrit ja raiejärgne puistu tihedus on 2000-2500 tk/ha. Kuusekultuuris tehakse esimene valgustusraie, kui peapuuliigi puud on vähemalt ühe meetri kõrgused. Teine valgustusraie tehakse, kui kuuskede keskmine kõrgus on kolm kuni viis meetrit ning raiejärgne puistu tihedus on 1800-2200 tk ha<sup>-1</sup>. Arukasenoorendike esimese valgustusraiega tuleb säilitada parimate tüveomadustega kased ja kasvuruumi olemasolul ka okaspuu looduslik uuendus. Arukasenoorendikes tehakse teine valgustusraie kui peapuuliigi keskmine kõrgus on neli kuni seitse meetrit ning raiejärgne puistu tihedus on 1600-1800 tk ha<sup>-1</sup> (Metsanduse programmi... 2020).

Valgustusraie lõpptulemus sõltub kasvukohast ja metsaomaniku kasvatuseesmärkidest. Okaspuuenamusega puistu välja kasvatamiseks tuleb lehtpuud eemaldada või jätta hektari kohta kasvama 200-300 puud (Laas 2015). Lehtpuid jäetakse kasvama juhul, kui omaniku eesmärk on moodustada okas- ja lehtpuu segamets või on lehtpuid vaja hõreda okaspuunoorendiku täienduseks. Pehmelehtpuude väljaraiel on kaks varianti: kahe kuni kolme meetri kõrgusest okaspuunoorendikust raiutakse välja kõik lehtpuud, mis hiljem loodusliku uuenemise tulemusel tagasi tekivad, või jäetakse alles okaspuuga sama vanad või nooremad lehtpuud (Laas jt 2011).

Riigimetsa Majandamise Keskus (RMK) tegi 2019. aastal metsauuenduse hooldust 24 618 hektaril ja valgustusraiet 18 527 hektaril (RMK aastaraamat... 2020). Eesti erametsade kohta puudub täpne info, sest valgustusraie puhul ei pea metsaomanik metsateatist esitama (Metsaseadus prg 41 lg 1.1).

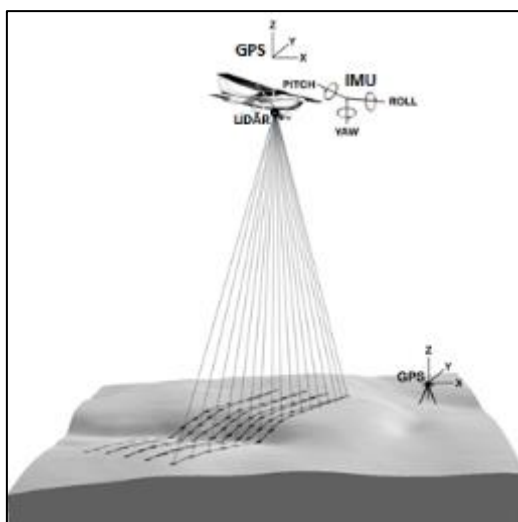
### **1.3. Aerolaserskaneerimine ja lidariandmete olemus ning töötlemine**

Lidar (LiDAR - *Light Dedection And Ranging*) on laseril põhinev seade, mida kasutatakse kaugseires. Lidar on aktiivne süsteem, mis toodab skaneerimiseks vajamineva energia ise. Seade koosneb kolmest põhilisest osast: impulsi edastaja ehk saatja, salvesti ehk vastuvõtja ja opto-mehhaaniline seade. Lidar saadab kindlas suunas välja valgusimpulsid, mis olenevalt keskkonnast peegelduvad tagasi, neelduvad või hajuvad. Peegeldunud signaalid salvestatakse ja tulemuseks on kolmemõõtmeline punktipilv, kus igal punktil on peegelduste asukoha koordinaadid (X,Y,Z). Koordinaatide arvutamisel kasutatakse valgusimpulsi teeloleku aega, signaali lähetusnurka, lennuki asukoha andmeid GPS (GPS – *Global*

*positioning* system) ja GNSS järgi (GNSS - *Global navigation satellite system*), lennuki asendianduri (IMU – *Inertial measurement unit*) kaldenurkasid ja atmosfääri andmeid (Heritage, Large 2009, Maa-amet 2021a). GNSS maapealne baasjaam on seotud kohaliku koordinaatsüsteemiga, milleks Eestis on L-EST97 süsteem (Maa-amet 2021b).

Metsanduslikel laserskaneerimistel kasutatakse valgusimpulsse lainepikkusega 900-1064 nm (lähiiinfrapunane spektripiirkond). Selles vahemikus on taimestikul kõrge peegelduvus ja poolläbipaistev struktuur, seega teavet saab nii puude võrastiku kui ka maapinna kõrguste kohta (Kasischke jt 2004). Puude võrastiku suunas emiteeritud ühest valgusimpulsist registreerivad enamik skannereid mitu peegeldust ehk toimub jagunemine ja sedasi saadakse teavet puude võrastiku struktuuri kohta (Naasset 1997).

Aerolaserskaneerimine (ALS – *Airborne laser scanning*) on üks kaugseire meetoditest, kus lidari seade on paigutatud õhusõidukile (Maa-amet 2021a). ALS meetod võimaldab kiirelt mõõdistada suuri ja ligipääsmatuid alasid. Topograafilist informatsiooni on võimalik koguda kiirusel  $90 \text{ km}^2 \text{ h}^{-1}$  (Heritage, Large 2009). Eestis alustati aerolaserskaneerimisega alates 2008. aastast ja kogu riigi territooriumi mõõdistamiseks kulub neli aastat. Alates 2017. aastast kasutab Maa-amet aerolaserskannerit Riegl VQ-1560i, mille üle-eestiline punktitiheus 2600-meetrise lennukõrguse puhul on 2,1 punkti  $\text{m}^{-2}$  ja vaateväli on  $58^\circ$ . Skanneril on kaks laserit, mis mõõdistamisel emiteerivad 1064 nm lainepikkusega impulsse sagedusega 350 kHz. Riegl skanner registreerib ühest peegeldusest kuni 15 peegeldust ehk peegeldusjärku, sõltuvalt signaalide emiteerimise sagedusest (Maa-amet 2021b, Maa-amet 2021c, Riegl 2021). Joonisel 1.3.1 on kujutatud ALS mõõdistuse lihtsustatud skeem.



**Joonis 1.3.1.** Aerolaserskaneerimise tööpõhimõtet tutvustav skeem, millel on kujutatud lennukile paigaldatud lidar koos sellest väljuvate valgusimpulssidega, lennukil asuv GPS ja asendiandur IMU ning maapealne GNSS jaam (Computer applications... 2006)

ALS kõrguslik täpsus sõltub topograafia keerukusest ning IMU asendianduri ja GNSS asukoha määramise vigadest (Heritage, Large 2009). Kõrguspunktide asukoha täpsus sõltub lisaks lidari sensori positsioonist, distantist peegeldunud objekti ja lidari vahel ning lidari vaatenurgast. Parema täpsuse saavutamiseks peavad maapaealsed GNSS jaamad asuma mõõdistusalast maksimaalselt 25 kilomeetri raadiuses (Katzenbeisser 2003). Maa-amet vähendab vigasid kontrollpunktidega, mis on maa pealt mõõdetavad kõva kattega taimestikuta pinnad. Samuti tasandatakse lennuribade ülekattega aladel omavahelised hälbed ja saadud tulemust kontrollitakse mõõdistatud kontrollpunktide suhtes. Maa-amet korrigeerib täpsust lisaks autole paigaldatud GNSS seadmega. Esmalt mõõdetakse GNSS vastuvõtuantenni kõrgus maapinnast, seejärel sõidetakse kõva kattega teel ühtlase kiirusega (60-70 km/h) ning iga 10 meetri järel salvestatakse sõiduki asukoht. Fikseeritud kõrguse standardhälve on esialgu kuni 7 cm, mida tasandatakse kontrollpunktidega ning lõpptulemusena saadakse kõrguse täpsus standardhällbega kuni 3 cm. ALS punktipilve täpsus sõltub ka lennukõrgusest. Lidar emiteerib koherentset signaali, kuid impulsi kuju on koonusekujuline, mille tõttu langeb impulss maapinnale teatud läbimõõduga alas. Näiteks 2600 meetrise lennukõrgusega registreeritakse peegeldus maapinnalt alas, mille läbimõõt on 47 cm. Selle tulemusel on peegelduse asukohatäpsus kuni pool peegeldusjälje läbimõõdust (Maa-amet 2021a, Riegl 2021).

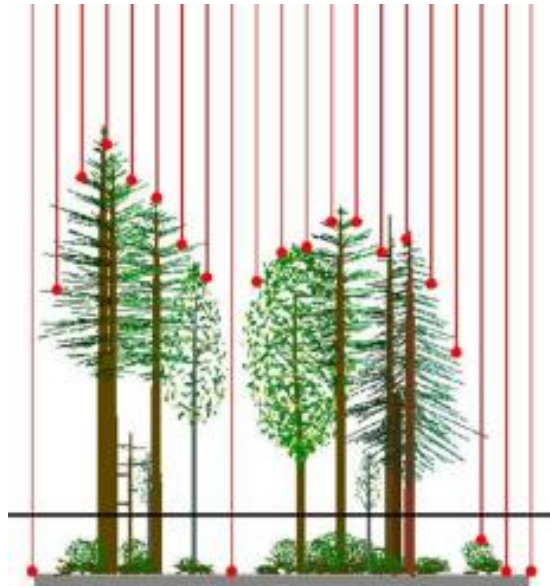
ALS andmete töötlemiseks kasutatakse peamiselt tarkvarasid LAStools ja FUSION. Mõlemad tarkvarad sisaldavad puittaimestikuga ala iseloomustamiseks sobivaid funktsioone. Lidariandmete töötlemisel kasutatakse ka vabavaralist andmetöötluskeskkonda R ja selle paketti LidR (Beland jt 2019).

#### 1.4. ALS andmete ja takseertunnuste seosed

Metsaosa või puistu takseertunnuste ja lidariandmete seostamiseks kasutatakse meetrikuid, mis on arvutatud lidariandmetest sobiva ruumilise lahutusega pikslite kaupa või uuritava puistu piires. Aerolaserskaneerimisel tekkinud punktipilvest on võimalik saada valgusimpulsside peegelduste kõrgusjaotused, mis on tihedas seoses puistu võrastiku struktuuriga ja seeläbi ka metsa peamiste takseertunnustega. ALS andmed sisaldavad mitmeid peegeldusjärkusi ( $P$ ) ning nende kasutamisel saab lidariandmetest arvutada katvuse hinnangu, mis annab informatsiooni rinnasdiameetri, puude arvu, rinnaspindala ja täiuse kohta (Lang, Anniste, Arumäe 2012). Katvus ja liitus kirjeldavad kasvuruumi kasutamist puistuelementide võrastiku projektsioonide kaudu referentspinnale (metsaalune maapind). Katvus on üksikpuude võraprojektsioonide ühendi pindala ja referentspindala suhe. Lidariandmetest saab kõiki peegeldusi arvestavat katvuse hinnangut  $K_k(z_n)$  arvutada järgmise valemiga:

$$K_k(z_n) = \sum(P | h_p > z_n) / \sum P, \quad (1)$$

kus  $z_n$  on referentspinna kõrgus ja  $h_p$  peegeldusjärgu kõrgus. Katvuse hinnang kahaneb referentspinna kõrguse kasvades ja sõltub peegeldusjärkude valikust (Lang 2010). Võrastiku katvuse arvutamise protsessi iseloomustab joonis 1.4.1.



**Joonis 1.4.1.** FUSION mooduli CloudMetrics katvuse arvutamise skeem. Vertikaalsed jooned on lidari emiteeritud valgusimpulsid ja horisontaalne joon referentspind  $z$ . Lidarist on välja saadetud 21 impulssi, millest 16 peegeldust on salvestatud referentspinnast kõrgemal ehk võrastikust. Seega katvus on  $16/21=0,76$  (McGaughey 2020)

Puistu keskmist kõrgust  $H$  saab hinnata punktipilve kõrgusjaotuse protsentiilil  $H_q$  põhineva lineaarse mudeliga (Lang, Arumäe, Anniste 2012):

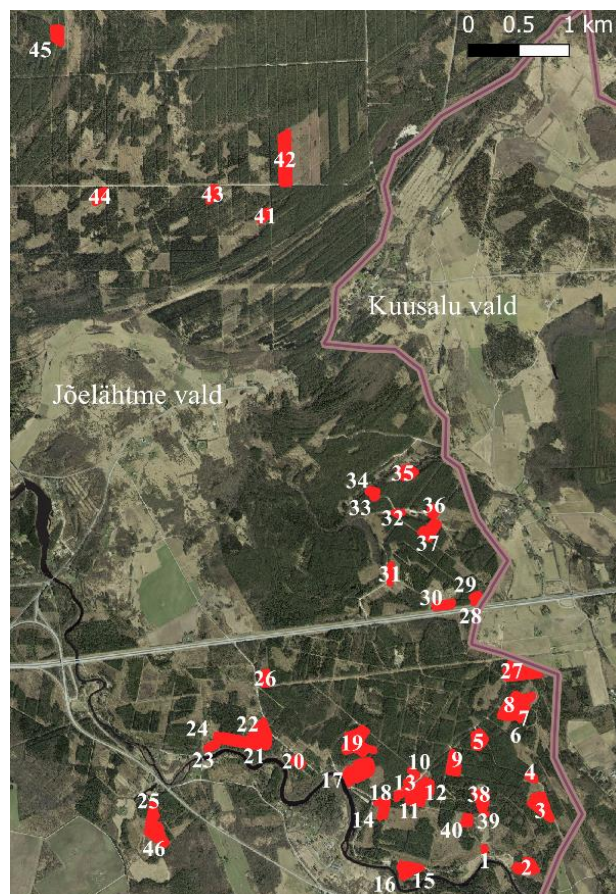
$$H = a + bH_q, \quad (2)$$

kus  $a$  ja  $b$  on mudeli hinnatavad parameetrid. Kõrgusjaotuse protsentiilid  $H_q$  arvutatakse FUSION mooduliga CloudMetrics ja need kirjeldavad kõrgust, millest  $q$ -protsenti punktipilve peegelduste kõrgusväärtustest on väiksemad kui  $H_q$  (McGaughey 2020). Puistu keskmise kõrguse hindamiseks sobib hästi punktipilve kõrgusjaotuse 80-protsentiil  $H_{80}$ , sest see on puistu keskmise kõrgusega  $H$  tugevas lineaarses korrelatsioonis (Arumäe 2020). Kõrguse hindamisel ALS andmete alusel peab arvestama eraldiste piiriveaga, mis võib olla kuni 10 meetrit. Kultuuri või noorendiku naabereraldise kõrged puud võivad tekitada ALS andmetelt kõrguse hindamisel positiivse vea (Arumäe, Lang 2016).

## **2. MATERJAL JA METOODIKA**

### **2.1. Alusandmed**

Andmeanalüüsi ja mudelite koostamise jaoks tehti 2020. aasta suvel ja sügisel väливаatlusi Harjumaal Jõelähtme vallas riigimetsa raiestikel, okaspuukultuurides ja -noorendikes, kus hinnati kultiveeritud ja looduslikult tekkinud puistuelementide vanust, tihedust, puistu koosseisu, kõrgust, läbimõõtu ja kirjeldati eraldisel kasvavat rohurinnet. Lisaks pandi kirja varasemalt tehtud metsamajanduslikud tööd (uuendustööd ja hooldusraied) ning hinnati, milliseid hooldusraieid peab tegema järgmise kümne aasta jooksul. Kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadust hinnati vastavalt eraldiste puistuelementide tihedusele ja rohurinde kõrgusele ning tihedusele. Kokku oli valimis 46 eraldist, mille asukoha skeem on kujutatud joonisel 2.1.1.

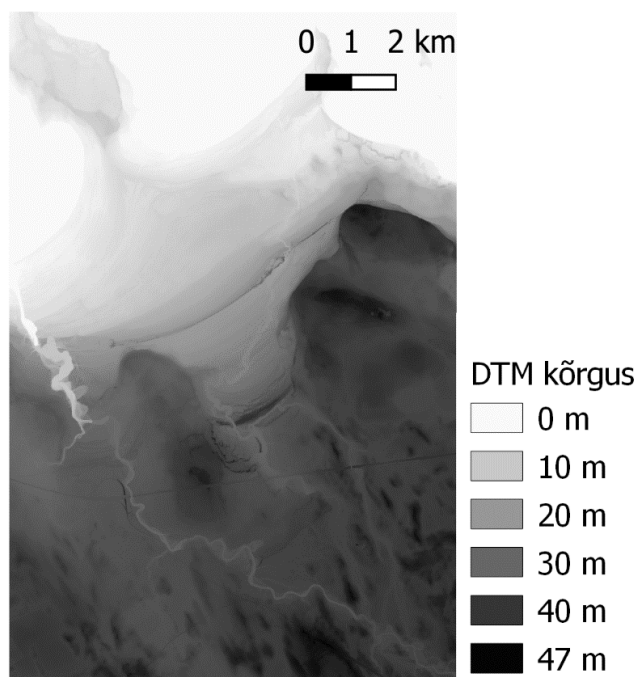


**Joonis 2.1.1.** Eraldiste asukoha skeem koos vaadeldud okaspuukultuuride ja -noorendike järjekorranumbriga (Maa-amet 2021e)

Iga vaadeldud eraldis jäädvustati fotokaameraga ning hilisema eraldiste väljavõtte tegemiseks salvestati asukoha koordinaadid. Pildid vaadeldud eraldistest on toodud lisas 1. RMK eraldiste piiride info saadi magistritöö juhendajalt.

ALS andmed on Maa-ameti veebilehelt vabalt kättesaadavad ja need salvestati välisele andmekandjale (Maa-amet 2021d). ALS mõõdistus tehti kevadel ajavahemikus 29.03.-23.04.2020 (Maa-amet 2021b). Uuringualast visuaalse ülevaate saamiseks ja eraldiste piiride kontrollimiseks salvestati Maa-ameti veebilehelt ortofotod, mis on pildistatud samaaegselt ALS mõõdistusega (Maa-amet 2021d). Kõrgusandmete normeerimiseks maapinnaga kasutati Maa-ameti poolt koostatud maapinna kõrgusmudelit (DTM – *digital terrain model*) ruumilise eraldusvõimega viis meetrit. DTM on kujutatud joonisel 2.1.2.





**Joonis 2.1.2.** Maapinna kõrgusmudel (Maa-amet 2021d)

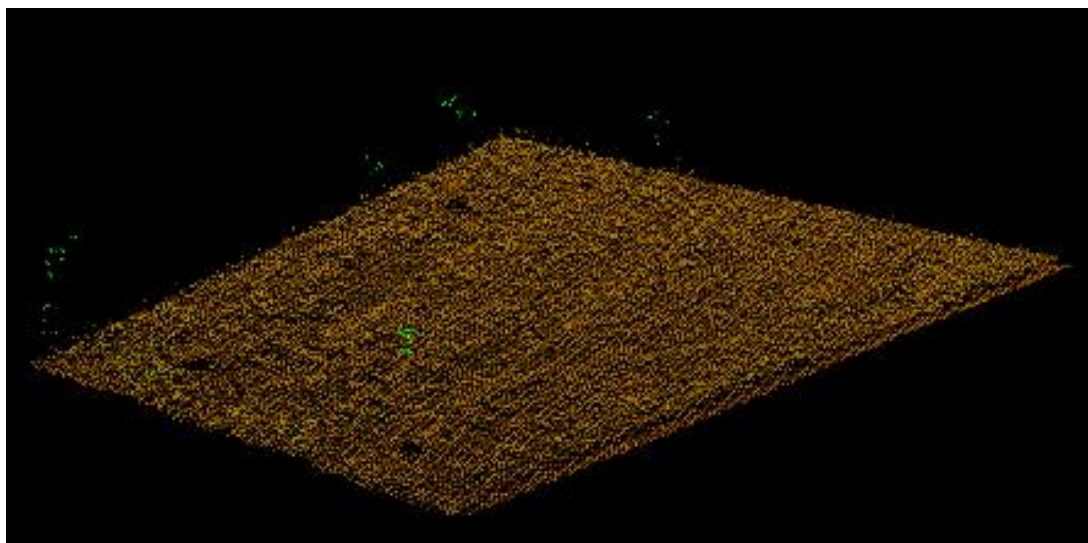
Uuringualal kasutatud DTM kõrgus varieerub vahemikus 0 (merepind) kuni 46,9 meetrit, keskmine kõrgus on 22,9 meetrit ja standardhälve on 16,2 meetrit. DTM võib sisaldada tihedast alustaimestikust põhjustatud viga, kus alustaimestikult registreeritud peegeldused lisatakse maapinna osaks. Vea vähendamiseks tehakse ALS mõõdistuslend kevadel enne vegetatsiooniperioodi (Maa-amet 2021a).

Mudelite valideerimiseks kasutati RMK Harjumaa metskonna 2020. aastal tehtud (n=184) ja 2021. aastaks planeeritud (n=266) kultuuride hoolduste ja valgustusraiete infot. Enne ALS mõõdistuslendu oli kultuuride hooldus ja valgustusraie tehtud 47 eraldisel. Riigimetsa eraldistel tehtud tööde ja plaanide teave saadi RMK-st.

## 2.2. Lidariandmete töötlemine

Lidariandmete töötlemiseks kasutati programmi FUSION/LDV 4.10 (McGaughey 2020), andmetöötluskeskkondasid R 4.0.4 (R-project 2021) ja Microsoft Excel 365. ALS andmete kõrguste normeerimiseks maapinnaga lahutati punktipilvest DTM kasutades FUSIONi

moodulit ClipData. Järgnevalt kontrolliti vaatlusaluste eraldiste piire programmis QGIS 3.10.10 (QGIS 2021), kus ortofotode baasil hinnati metsatakseerimisel moodustatud piiride täpsust ja asjakohasust reaalse olukorraga. Vajadusel muudeti manuaalselt eraldiste piire aladel, kus lageraie tehti eraldisest suuremal või väiksemal alal ja mitmel kõrvuti asetseval eraldisel korraga, misjärel on ala kultiveeritud sama puuliigiga. Piire muudeti ka põhjusel, et osad eraldised sisaldasid laiu rekonstrueeritud metsateid ja kraave. Samuti oli mõne eraldise piires mullastik erinev ja seetõttu rohukasv varieeruv. Eraldiste piiride korrigeerimise eesmärk oli tekitada võimalikult homogeenised katsealad, et ALS andmetest meetrikute koostamisel saada täpsem teave. Mudelite valideerimisandmestiku eraldiste piire puhverdati 10 meetrit sisse, välistamaks servaefektist tulenevaid vigu (Arumäe, Lang 2016). FUSION PolyClipData mooduliga eraldati normeeritud kõrgustega punktipilvest vaatlusalused ja valideerimisandmestiku eraldised. Üldisest punktipilvest lõigatud eraldise lidariandmed on näitena visualiseeritud joonisel 2.2.1.



**Joonis 2.2.1.** Kvartal JG125 eraldise 12 lidari punktipilv visualiseeritud kujul

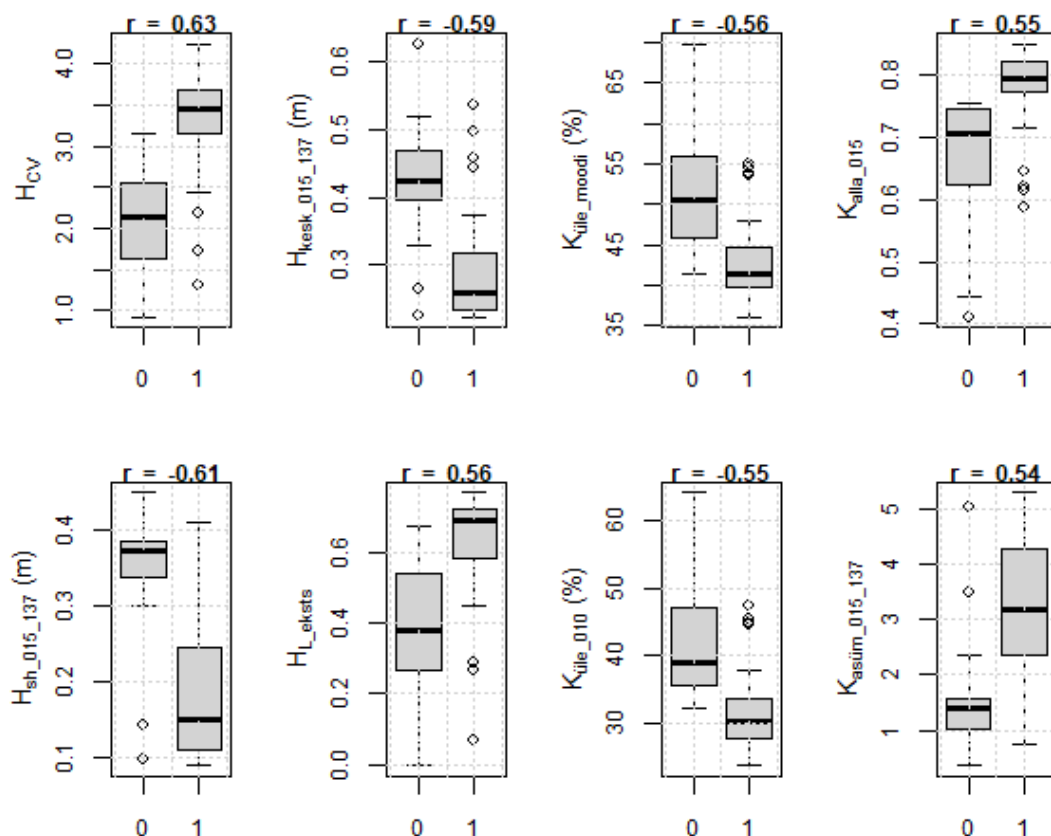
Lõigatud eraldiste kohta arvutati punktipilve kirjeldavad meetrikud FUSION mooduliga CloudMetrics. ALS meetrikute arvutamisel seati alumiseks kõrguspiiriks viis sentimeetrit, et jätta välja maapinnast eeldatavalt madalamad peegeldused ja ülemiseks kõrguspiiriks 15 meetrit, et vähendada kultuuridest ja noorendikest kõrgemate säilikpuude mõju. FUSION moodul CloudMetrics võimaldab ALS punktipilve iseloomustada kihtide kaupa. Kihtide

kõrguste väärtusi saab vastavalt vajadusele muuta, kuid käesolevas töös kasutati ALS meetrikute arvutamisel programmi vaikimisi kõrgusjaotust väärtustega 0,15 m, 1,37 m, 5 m, 10 m, 20 m ja 30 m. Ülemise ja alumise kõrguspiiri kasutamisel peab arvestama, et kihte kirjeldavad ALS meetrikud piiridest välja jäävaid lidariandmeid ei hõlma (McGaughey 2020).

### 2.3. Mudelite koostamine

Mudelite koostamiseks tehti logistiline regressioonanalüüs. Eraldiste ALS andmetest koostatud meetrikute ja kultuuride hoolduse ning valgustusraie vajaduse hinnangu matemaatiliseks seostamiseks lisati iga eraldise vaatlusandmestikule numbriline väärtus üks ja null, kus väärtuse üks korral peab kultuuride hooldust või valgustusraiet tegema ühe kuni kolme aasta jooksul (kokku 28 eraldist) ning null väärtuse puhul peab hooldusraie tegema alles peale kolmandat aastat (kokku 18 eraldist). Nimetatud otsused tehti tuginedes vaatlusandmetele, mis on nähtavad lisas 2. Tegemist on kodeerimisega, kus mitteamplituudse tunnuse töötlemiseks diskreetse juhusliku suurusena seatakse tunnuse tekstilisele väärtusele vastavusse arvud, mis on binoomjaotusega (Kiviste 2007). Binoomjaotus on klassikalises statistikas kasutatav juhusliku täisarvulise suuruse  $X$  diskreetne jaotus, mis kirjeldab sõltumatute ja järjestikuste katsete korral sündmuse toimumist, kui katsete tulemus on üks või null ning tulemuste saamise tõenäosus on  $p$  ning vastupidise tulemuse tõenäosus on  $q = 1-p$  (Pihlak 2018). Vaadeldud eraldistel vajalike tööde kirjeldus ning lisatud binaarsed tunnused üks ja null on toodud lisas 2.

Mudeli jaoks teavet kandvate ALS pilvemeetrikute leidmiseks uuriti andmetöötluskeskkonnas R vaadeldud eraldiste ALS meetrikute ning kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hinnangute korrelatsioone. Selleks koostati kõigist ALS meetrikutest (kokku 177) ning binaarsetest tunnustest üks ja null seoste graafikud, misjärel vaadati graafikud visuaalselt üle ja vastavalt seose headusele ja ALS meetriku olemusele valiti välja 24 ALS meetrikut, seejuures suurim korrelatsiooni ( $r$ ) väärtus binaarse tunnusega üks ja null on 0,63. Joonisel 2.3.1 on kujutatud kaheksa ALS meetriku seoste graafikud binaarse tunnusega üks ja null, ülejäänud 18 ALS meetriku seoste graafikud on esitatud lisas 3 oleval joonisel.



**Joonis 2.3.1.** Vaadeldud eraldiste ALS meetrikute seoste graafikud kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadusega. ALS meetrikute selgitused on tabelis 2.3.1. Väärtuse null (n=18) puhul peab hooldusraie tegema alles peale kolmandat aastat ja väärtuse üks (n=28) korral ühe kuni kolme aasta jooksul

Joonise 2.3.1 graafikutelt on näha, et kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus suureneb järgmiste ALS meetrikute väärtuste tõustes:  $H_{CV}$ ,  $K_{alla\_015}$ ,  $H_{L\_eksts}$  ja  $K_{asüm\_015\_137}$ . Hooldusraie vajadus suureneb järgmiste ALS meetrikute väärtuste vähenedes:  $H_{kesk\_015\_137}$ ,  $K_{üle\_moodi}$ ,  $H_{sh\_015\_137}$  ja  $K_{üle\_010}$ . ALS meetrikute keskvaartused, minimaalne ja maksimaalne väärtus ning standardhälve on toodud lisas 4. ALS meetrikute selgitused ning korrelatsioonid binaarsete tunnustega üks ja null on esitatud tabelis 2.3.1.

**Tabel 2.3.1.** ALS meetrikute tähised, selgitused ja korrelatsioonid (r) binaarsete tunnustega üks ja null. Väärtuse üks korral peab hooldusraie tegema ühe kuni kolme aasta jooksul ja väärtuse null korral alles peale kolmandat aastat

Nr	Tähis	ÜHIK	Meetriku selgitus	r
1	H <sub>CV</sub>		peegelduste kõrguse variatsioonikoefitsient	0.626
2	H <sub>sh_015_137</sub>	m	peegelduste keskmise kõrguse standardhälve vahemikus 0,15-1,37 meetrit	-0.614
3	H <sub>kesk_015_137</sub>	m	peegelduste kõrguste keskvaartus vahemikus 0,15-1,37 meetrit	-0.588
4	H <sub>L_eksts</sub>		kõrguste ekstsess/järskuskordaja, L-moment	0.563
5	K <sub>üle_moodi</sub>	%	kõrguste moodist kõrgemate peegelduste osakaal kõigist peegeldustest	-0.563
6	K <sub>üle_010</sub>	%	0,1 meetrist kõrgemate peegelduste osakaal kõigist peegeldustest	-0.555
7	K <sub>alla_015</sub>		alla 0,15 meetri olevate peegelduste osakaal kõigist peegeldustest	0.547
8	K <sub>asüm_015_137</sub>		asümmeetriakordaja vahemikus 0,15-1,37 meetrit	0.545
9	K <sub>üle_moodi/1</sub>	%	moodist kõrgemate peegelduste ja esimeste peegelduste suhe	-0.544
10	K <sub>üle_kesk</sub>	%	keskmisest kõrgemate peegelduste ja kõigi peegelduste suhe	-0.541
11	K <sub>üle_010/1</sub>	%	0,1 meetrist kõrgemate peegelduste ja kõigi esimeste peegelduste suhe	-0.536
12	K <sub>1_üle_moodi</sub>	%	moodist kõrgemate esimeste peegelduste ja kõigi peegelduste suhe	-0.534
13	K <sub>üle_kesk/1</sub>	%	keskmisest kõrgemate peegelduste ja esimeste peegelduste suhe	-0.529
14	K <sub>1_üle_010</sub>	%	0,1 meetrist kõrgemate peegelduste ja esimeste peegelduste suhe	-0.525
15	H <sub>kesk</sub>	m	peegelduste kõrguste keskvaartus	-0.520
16	H <sub>L1</sub>		tõenäosusjaotuse kuju, 1. L-moment	-0.520
17	K <sub>võra</sub>		võrast peegeldunud impulsside osakaal kõigist peegeldustest	-0.520
18	H <sub>P80</sub>	m	kõrgus, millest 80% peegeldusi tuli madalamalt	-0.518
19	H <sub>CV_015_137</sub>		peegelduste kõrguse variatsioonikoefitsient vahemikus 0,15-1,37 meetrit	-0.517
20	K <sub>1_üle_kesk</sub>	%	esimeste peegelduste osakaal üle keskmise	-0.506
21	H <sub>P90</sub>	m	kõrgus, millest 90% peegeldusi tuli madalamalt	-0.505
22	H <sub>L2</sub>		tõenäosusjaotuse kuju, 2. L-moment	-0.499
23	H <sub>015_137_eksts</sub>		kõrgusjaotuse järskuskordaja vahemikus 0,15-1,37 meetrit	0.477
24	H <sub>L_asüm</sub>		kõrgusjaotuse asümmeetriakordaja, L-moment	0.438

Mudelite koostamiseks kasutati andmetötlustarkvara R protseduuri glm (*general linear model*, üldine lineaarne mudel) koos *logit* teisendusega, mis on vajalik binoomjaotusega andmestiku puhul (Kaart 2012). Logistilise regressioonanalüüsiga koostatud mitmeste mudelite hindamiseks kasutati statistilisi näitajaid AIC (*Akaike's information criterion*), McFaddeni pseudo-determinatsioonikordajat  $R^2_m$  ja AUC (*area under curve*). AIC arvutatakse valemiga:

$$AIC = 2k - 2\log(L_c), \quad (3)$$

kus  $k$  on mudeli prognoositud parameetrite arv ja  $L_c$  on prognoosiva mudeli tõepära (Akaike 1974). Mudelite AIC väärtusi võrreldi omavahel ja eelistati väiksema AIC väärtusega mudeleid. McFaddeni pseudo-determinatsioonikordajat  $R^2_m$  kasutatakse mudeli headuse hindamiseks logistilise regressioonanalüüsi puhul.  $R^2_m$  valem on järgnev:

$$R^2_m = 1 - \frac{\log(L_c)}{\log(L_0)}, \quad (4)$$

kus  $L_0$  on argumenttunnusteta mudeli (null-mudel) tõepära (McFadden 1973). AUC kirjeldab ROC (*receiver operating characteristic curve*) analüüsi käigus koostatud ROC-kõvera alust pindala, kus mudeli headuse tõustes suureneb AUC väärtus, seejuures ideaalne väärtus on üks. ROC-kõver on mudeli prognoositud parameetrite tõeselt positiivsete ja valepositiivsete väärtuste võrdluskõver (Kaart 2012).

Mudelisse lisati esmalt manuaalselt tabelis 2.3.1 olevaid meetrikuid, prooviti erinevaid kombinatsioone ja jäeti välja statistiliselt väheolulised ALS meetrikud. Tekitati kolm mudeli üldkuju, mis sisaldasid argumenttunnustena kaks, kuus ja seitse ALS meetrikut. Seejärel koostati programmis R tsükkel, mis lähendas mudeli parameetrite väärtused kasutades tabelis 2.3.1 olevate ALS meetrikute kõiki kombinatsioone kahe, kolme, nelja ja viie argumenttunnuse kaupa. Mudelite statistilised näitajad AIC, pseudo- $R^2_m$ , AUC, mudelite p-väärtused ja argumenttunnuste parameetrite p-väärtused koguti eraldi andmetabelisse. Programmis R tehtud tsükliga saadi mudelite koguarvuks 55 430, millest valiti välja 42 madalama AIC ja suurema pseudo- $R^2_m$  ja AUC väärtusega mudelit. Saadud 42-st mudelist filtreeriti välja viis mudelit, mille argumenttunnuste p-väärtused olid väiksemad kui 0,05 ja lisaks valiti välja eksperimenteerimiseks mudeleid, mille osade argumenttunnuste p-väärtused olid suuremad kui 0,05 ja AUC oli suurem kui 0,95. Mudelite valikul eelistati vähemate argumenttunnustega mudeleid ja valikusse lisati üks kahe ALS meetriku elemendiga ja üks kolme elemendiga mudel. Kokku tekitati ja valiti välja 12 mudelit. Kultuuride hooldust ja valgustusraie vajadust (*mudel<sub>n</sub>*) kirjeldavate mudelite kujud on järgmised:

$$mudel_1 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m24} + b_2 \cdot ALS_{m4}, \quad (5)$$

$$mudel_2 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m5} + b_2 \cdot ALS_{m19}, \quad (6)$$

$$mudel_3 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m1} + b_2 \cdot ALS_{m24}, \quad (7)$$

$$mudel_4 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m12} + b_2 \cdot ALS_{m5} + b_3 \cdot ALS_{m19}, \quad (8)$$

$$mudel_5 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m14} + b_2 \cdot ALS_{m6} + b_3 \cdot ALS_{m19}, \quad (9)$$

$$mudel_6 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m1} + b_2 \cdot ALS_{m24} + b_3 \cdot ALS_{m12}, \quad (10)$$

$$mudel_7 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m22} + b_2 \cdot ALS_{m24} + b_3 \cdot ALS_{m4} + b_4 \cdot ALS_{m17}, \quad (11)$$

$$mudel_8 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m15} + b_2 \cdot ALS_{m22} + b_3 \cdot ALS_{m24} + b_4 \cdot ALS_{m4}, \quad (12)$$

$$mudel_9 = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m1} + b_2 \cdot ALS_{m14} + b_3 \cdot ALS_{m6} + b_4 \cdot ALS_{m20} + b_5 \cdot ALS_{m10}, \quad (13)$$

$$mudel_{10} = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m1} + b_2 \cdot ALS_{m6} + b_3 \cdot ALS_{m12} + b_4 \cdot ALS_{m7} + b_5 \cdot ALS_{m19}, \quad (14)$$

$$mudel_{11} = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m24} + b_2 \cdot ALS_{m4} + b_3 \cdot ALS_{m14} + b_4 \cdot ALS_{m6} + b_5 \cdot ALS_{m20} + \\ + b_6 \cdot ALS_{m10}, \quad (15)$$

$$mudel_{12} = b_0 + b_1 \cdot ALS_{m24} + b_2 \cdot ALS_{m4} + b_3 \cdot ALS_{m14} + b_4 \cdot ALS_{m6} + b_5 \cdot ALS_{m20} + \\ + b_6 \cdot ALS_{m10} + b_7 \cdot ALS_{m3}, \quad (16)$$

kus  $b_n$  on koefitsiendid ja  $ALS_{mn}$  on ALS meetrikud, mille numeratsiooni ( $n$ ) leiab tabelist 2.3.1. Mudelite statistilised parameetrid AIC, McFaddeni pseudo-determinatsioonikordaja  $R^2_m$ , AUC ja p-väärtus on toodud tabelis 2.3.2.

**Tabel 2.3.2.** Mudelite statistilised näitajad AIC, pseudo- $R^2_m$ , AUC ja p-väärtus.

Mudel	AIC	$R^2_m$	AUC	p-väärtus
mudel <sub>1</sub>	46.22	0.35	0.90	2.30E-05
mudel <sub>2</sub>	44.30	0.38	0.87	8.81E-06
mudel <sub>3</sub>	43.24	0.40	0.88	5.20E-06
mudel <sub>4</sub>	40.55	0.47	0.93	2.21E-06
mudel <sub>5</sub>	40.94	0.47	0.93	2.67E-06
mudel <sub>6</sub>	43.53	0.42	0.89	9.30E-06
mudel <sub>7</sub>	40.44	0.51	0.92	2.86E-06
mudel <sub>8</sub>	40.63	0.50	0.93	3.13E-06
mudel <sub>9</sub>	35.91	0.61	0.97	4.40E-07
mudel <sub>10</sub>	38.41	0.57	0.95	1.39E-06
mudel <sub>11</sub>	30.70	0.73	0.98	4.96E-08
mudel <sub>12</sub>	29.28	0.78	0.98	3.11E-08

Tabelis 2.3.2 on toodud 12 mudeli statistilised parameetrid, kus mudelite AIC on vahemikus 29,28 kuni 46,22.  $R^2_m$  ja AUC väärtused suurenevad ning AIC väärtused vähenevad

argumenttunnuste lisandumisel. Kõigi 12 mudeli p-väärtused on alla 0,05. Mudelite argumenttunnuste koefitsiendid on toodud tabelis 2.3.3.

**Tabel 2.3.3.** Mudelite parameetrite koefitsiendid

Mudel	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>
mudel <sub>1</sub>	2.55	-18.32	20.57					
mudel <sub>2</sub>	12.58	-0.16	-6.11					
mudel <sub>3</sub>	-2.13	4.20	-12.25					
mudel <sub>4</sub>	20.44	0.94	-1.24	-7.48				
mudel <sub>5</sub>	15.37	0.84	-1.11	-7.20				
mudel <sub>6</sub>	8.21	3.97	-17.29	-0.13				
mudel <sub>7</sub>	53.30	59.26	-149.08	96.86	-638.45			
mudel <sub>8</sub>	54.08	-42.28	58.62	-145.68	94.72			
mudel <sub>9</sub>	1.33	4.30	7.51	-7.99	-6.07	6.20		
mudel <sub>10</sub>	147.38	2.89	-2.61	1.14	-145.53	-9.93		
mudel <sub>11</sub>	39.66	-107.59	87.05	8.53	-8.97	-8.73	8.98	
mudel <sub>12</sub>	48.24	-137.48	117.72	12.18	-12.64	-12.52	13.19	-25.68

Mudelite parameetrite olulisused ehk p-väärtused on toodud tabelis 2.3.4.

**Tabel 2.3.4.** Mudelite parameetrite olulisus (p-väärtus). Punases kirjas on tähistatud p-väärtused, mis on suuremad kui 0,05. Rasvases kirjas on mudelid, mille kõikide argumenttunnuste p-väärtused on väiksemad kui 0,05

Mudel	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>
mudel <sub>1</sub>	0.3395	0.0306	0.0033					
<b>mudel<sub>2</sub></b>	0.0003	0.0148	0.0260					
mudel <sub>3</sub>	0.2242	0.0059	0.0704					
<b>mudel<sub>4</sub></b>	0.0006	0.0363	0.0183	0.0125				
<b>mudel<sub>5</sub></b>	0.0004	0.0350	0.0191	0.0157				
mudel <sub>6</sub>	0.3126	0.0095	0.0374	0.1954				
<b>mudel<sub>7</sub></b>	0.0094	0.0110	0.0069	0.0049	0.0106			
<b>mudel<sub>8</sub></b>	0.0108	0.0128	0.0131	0.0077	0.0054			
mudel <sub>9</sub>	0.8701	0.0105	0.0179	0.0173	0.0263	0.0240		
mudel <sub>10</sub>	0.0143	0.0372	0.0078	0.0596	0.0099	0.0232		
mudel <sub>11</sub>	0.0936	0.0552	0.0243	0.0264	0.0247	0.0162	0.0159	
mudel <sub>12</sub>	0.1077	0.0623	0.0279	0.0280	0.0280	0.0212	0.0218	0.1097

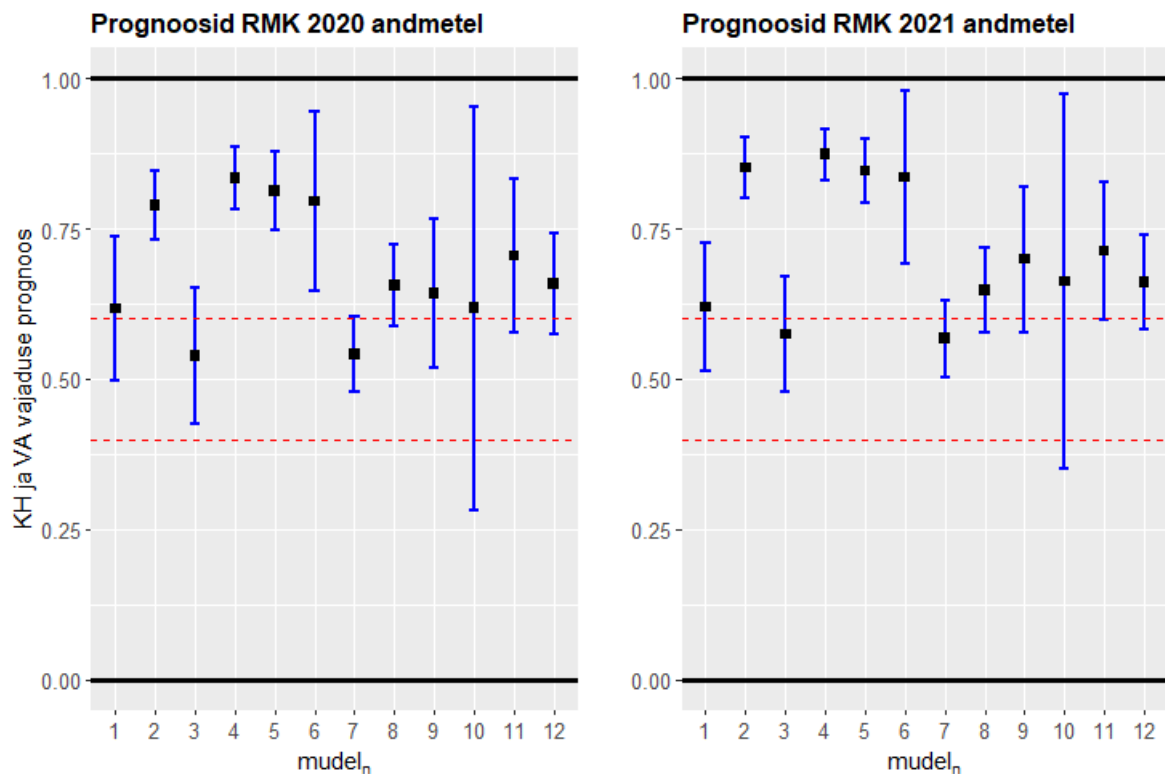


Parameetrite p-väärtused on alla 0,05 mudelitel mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub>, mudel<sub>5</sub>, mudel<sub>7</sub> ja mudel<sub>8</sub>. Mudelid mudel<sub>1</sub>, mudel<sub>3</sub>, mudel<sub>6</sub>, mudel<sub>9</sub>, mudel<sub>10</sub>, mudel<sub>11</sub> ja mudel<sub>12</sub> sisaldavad statistiliselt ebaolulisi argumenttunnuseid, kuid need jäeti valikusse ja kasutati testandmestikul eksperimenteerimiseks (tabel 2.3.4).

### 3. TULEMUSED

#### 3.1. Mudelite testimine RMK andmestikul

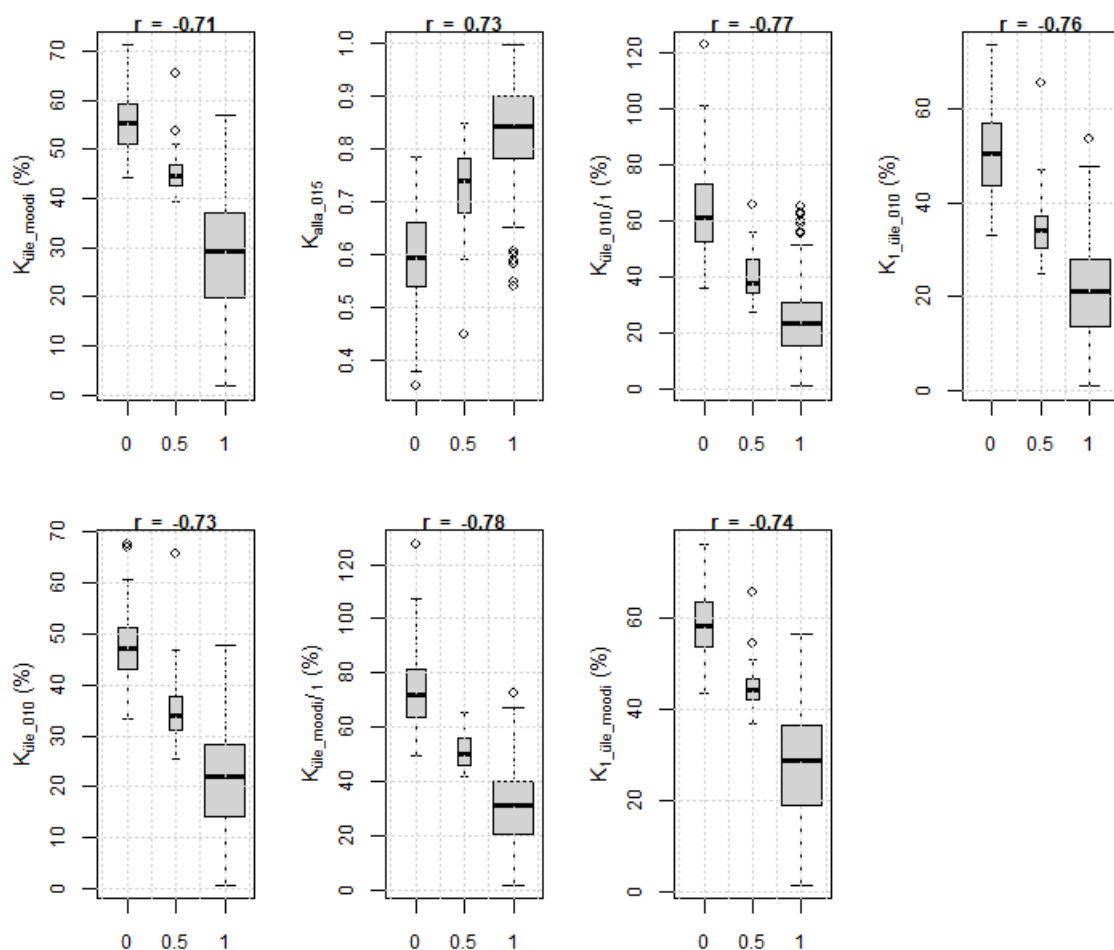
Validud 12 mudeliga tehti kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognoosid RMK 2020. aasta (n=184) ja 2021. aasta (n=266) eraldiste ALS andmete põhjal. Mudelite prognooside keskväärtused koos standardhälvetega on toodud joonisel 3.1.1.



**Joonis 3.1.1.** Mudelite prognooside keskväärtused ja standardhälve (sinine pidevjoon) RMK eraldiste ALS andmete põhjal. KH – kultuuride hooldus; VA – valgustusraie; punane punktiirjoon – alumine (y=0,4) ja ülemine (y=0,6) otsustuspiir; model<sub>n</sub> – ALS põhised mudelid (tabel 2.3.2)

Joonise 3.1.1 graafikutele on lisatud kaks punast punktiirjoont, mis jaotavad mudelite prognoosid kolme kategooriasse: vahemikus 0 kuni 0,4 olevate prognooside puhul peab kultuuride hoolduse ja valgustusraie tegema peale kolmandat aastat, vahemikus 0,4 kuni 0,6 olevate prognooside korral peab vastavad eraldised looduses üle kontrollima, andes hooldusraie vajaduse hinnangu eraldistel kohapeal ning vahemikus 0,6 kuni 1 väärtuste puhul peab kultuuride hoolduse ja valgustusraie tegema ühe kuni kolme aasta jooksul. RMK 2020. aastal tehtud tööde ja 2021. aasta plaanide kohaselt peab kultuuride hoolduse ja valgustusraie tegema ühe kuni kolme aasta jooksul, seega paremateks mudeliteks peetakse neid, mis prognoosivad eraldistele väiksema standardhälbega keskmiselt kõrgemaid väärtusi. Joonise 3.1.1 graafikute järgi on paremad mudelid mudel<sub>2</sub> (6), mudel<sub>4</sub> (8) ja mudel<sub>5</sub> (9), mis sisaldavad argumenttunnustena kaks kuni kolm ALS meetrikut. Keskmiselt kõige suuremaid väärtusi prognoosib mudel<sub>4</sub>. Nelja kuni seitsme ALS meetrikuga mudelite mudel<sub>7</sub> (11), mudel<sub>8</sub> (12), mudel<sub>9</sub> (13), mudel<sub>10</sub> (14), mudel<sub>11</sub> (15) ja mudel<sub>12</sub> (16) statistilised näitajad on head (tabel 2.3.2), kuid madalate keskmiste prognooside järgi on tegemist halvemate mudelitega. Samuti on halvemad suurema standardhälbega mudelid mudel<sub>1</sub> (5), mudel<sub>3</sub> (7) ja mudel<sub>6</sub> (10) (joonis 3.1.1). Prognooside hajuvus on suurim mudel<sub>10</sub> puhul.

Mudelitega mudel<sub>2</sub> mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> koostati kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognooside seoste graafikud tabelis 2.3.1 esitatud 24 ALS meetrikuga RMK 2020. aasta ja 2021. aasta eraldiste ALS andmete põhjal. Mudelite kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognoosid on tugevamas seoses seitsme katvust kirjeldava ALS meetrikuga. Mudelite seoste graafikud on sarnased mõlema RMK andmestiku korral, seega töös kõiki graafikuid ei esitata. RMK 2021. aasta andmestiku põhjal tehtud mudelite prognooside seoste graafikud ALS meetrikutega on esitatud lisas 5. Mudel<sub>2</sub> hooldusraie vajaduse prognooside ja ALS meetrikute seoste graafikud RMK 2020. aasta andmete põhjal on esitatud joonisel 3.1.2.



**Joonis 3.1.2.** Mudel<sub>2</sub> hooldusraie vajaduse prognooside ja seitsme ALS meetriku seoste graafikud RMK 2020. aasta andmete põhjal. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat (n=32), väärtuse üks korral tuleb raie teha ühe kuni kolme aasta jooksul (n=143), väärtuse 0,5 puhul peab raie vajaduse looduses kohapeal hindama (n=9)

Joonise 3.1.2 esimene graafik kujutab suuremat kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadust eraldistel, kus lidaripunktide kõrgusjaotuse moodist kõrgemal registreeritud peegelduste osakaal kõigist peegeldustest on väiksem ( $K_{üle\_moodi}$ ). ALS meetriku  $K_{alla\_015}$  kõrgemad väärtused näitavad eraldistel suuremat hooldusraie vajadust põhjusel, et maapinnani jõuab rohkem impulsse ehk taimkatte katvus on väiksem. ALS meetrikute  $K_{üle\_010/1}$ ,  $K_{1\_üle\_010}$  ja  $K_{üle\_010}$  seosed eraldiste kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadusega on üsna sarnased, kus meetrikute väärtuse vähenedes suureneb eraldiste hooldusraie vajadus. Nimetatud meetrikute ( $K_{üle\_010/1}$ ,  $K_{1\_üle\_010}$  ja  $K_{üle\_010}$ ) väärtused vähenevad juhul, kui maapinnani jõuab rohkem impulsse – see esineb kevadise

mõõdistuslennu ajal kui eraldistel pole tihedat rohttaimestikku ning lehtpuudel pole lehti. Punktide kõrguse moodist kõrgemate peegelduste ja esimeste peegelduste ( $K_{üle\_moodi/1}$ ) suhtarvu väärtuse vähenedes prognoosib mudel<sub>2</sub> suuremat hooldusraie vajadust. Viimase väiksem väärtus näitab, et rohkem impulsse registreeritakse punktipilve kõrguste moodist madalamal või maapinnal. Joonise 3.1.2 viimase graafiku ALS meetriku ( $K_{1\_üle\_moodi}$ ) korrelatsioon kultuuri hoolduse ja valgustusraie vajadusega sarnaneb eelmisele graafikule põhjusel, et enamik esimesi peegeldusi registreeritakse punktipilve kõrguste moodist madalamal.

Mudel<sub>2</sub> sisaldab ALS meetrikuid  $K_{üle\_moodi}$  ja  $H_{CV\_015\_137}$ , seega mudel<sub>2</sub> prognoosid RMK 2020. aasta andmestikul on tugevamas korrelatsioonis katvust kirjeldavate ALS meetrikutega (joonis 3.1.2). Mudelite mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> hooldusraie vajaduse prognooside ja ALS meetrikute seoste graafikud RMK 2020. aasta andmete põhjal sarnanevad joonisel 3.1.2 kujutatule, sest nimetatud mudelid sisaldavad samuti katvust kirjeldavaid ALS meetrikuid. Graafikute sarnasuse tõttu neid töös ei esitata. Katvuse arvutamisel nivooks  $z_n$  (1) kasutatav kõrgusjaotuse mood paikneb kas taimestiku kõige tihedamas horisontaalses kihis või hõreda taimestiku puhul maapinna lähedal. RMK 2020. aasta ja 2021. aasta andmestiku eraldiste ALS punktipilve kõrguste moodi väärtus on üldjuhul võrdne  $z_n$  väärtusega, mis on sisuliselt maapind. Erinditeks on RMK 2020. aasta andmestikus kuus ja 2021. aasta andmestikus üheksa eraldist, kus moodi väärtus on  $z_n$  väärtusest kõrgem.

Tabelis 3.1.1 on esitatud mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognooside kattuvuste arv RMK 2020. aasta ja 2021. aasta andmestikel.

**Tabel 3.1.1.** Mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> prognooside (HR) kattuvuste arv RMK 2020. aasta ja 2021. aasta andmestike eraldistel. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat, väärtuse üks korral tuleb raie teha ühe kuni kolme aasta jooksul, 0,5 puhul peab raie vajaduse looduses kohapeal hindama

Prognooside arv (tk)									
RMK 2020. aasta andmetel					RMK 2021. aasta andmetel				
mudel <sub>4</sub>	mudel <sub>2</sub>				mudel <sub>4</sub>	mudel <sub>2</sub>			
	HR	0	0.5	1		HR	0	0.5	1
	0	22	3	2		0	17	7	4
	0.5	2	4	0		0.5	0	3	3
	1	8	2	141		1	8	5	219
mudel <sub>5</sub>	mudel <sub>2</sub>				mudel <sub>5</sub>	mudel <sub>2</sub>			
	HR	0	0.5	1		HR	0	0.5	1
	0	19	3	1		0	18	7	5
	0.5	4	5	6		0.5	0	3	7
	1	9	1	136		1	7	5	214
mudel <sub>5</sub>	mudel <sub>4</sub>				mudel <sub>5</sub>	mudel <sub>4</sub>			
	HR	0	0.5	1		HR	0	0.5	1
	0	22	1	0		0	26	2	2
	0.5	4	5	6		0.5	2	2	6
	1	1	0	145		1	0	2	224

**Tabel 3.1.2.** Mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognooside (HR) osakaal RMK 2020. aasta andmestikul sõltuvalt ALS mõõdistuse ajast. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat, väärtuse üks korral tuleb raie teha ühe kuni kolme aasta jooksul, 0,5 puhul peab raie vajaduse looduses kohapeal hindama

Kultuuride hooldus ja valgustusraie tehtud 2020. aastal						
enne ALS mõõdistust (n = 47)				peale ALS mõõdistust (n = 137)		
HR	mudel <sub>2</sub>	mudel <sub>4</sub>	mudel <sub>5</sub>	mudel <sub>2</sub>	mudel <sub>4</sub>	mudel <sub>5</sub>
0	30%	30%	28%	13%	9%	7%
0.5	10%	4%	13%	3%	3%	7%
1	60%	66%	59%	84%	88%	86%

Enne ALS mõõdistust tehti kultuuride hooldus ja valgustusraie 47 RMK eraldisel, kus kolme mudeli kõigist prognoosidest umbes 61% on väärtusega üks ning ligi 30% prognoosidest on väärtusega null. Peale ALS mõõdistust tehti kultuuride hooldused ja valgustusraied 137 RMK eraldisel, kus mudelitega tehtud prognoosidest keskmiselt 86% on väärtusega üks ning umbes 10% on väärtusega null. Proportsioonid on kahe jaotuse korral erinevad, kuid mudelid prognoosisid protsentuaalselt rohkem null väärtusi ehk väiksemat hooldusraie vajadust RMK eraldistel, kus hooldusraied olid ALS mõõdistuse ajaks juba tehtud (tabel 3.1.2).

## 4. ARUTELU

Joonisel 2.3.1 ja lisas 3 esitatud 24 ALS meetriku ning kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse seoste graafikute põhjal selgub, et suurem hooldusraie vajadus on eraldistel, kus enamik lidari emiteeritud impulsse langeb maapinnale või punktipilve kõrguste keskväärtusest madalamale. Graafikutel esinevad mõned erandid. Maapinnale langevate impulsside osakaalu kõigist peegeldustest kirjeldavad meetrikud  $K_{üle\_010}$ ,  $K_{üle\_010/1}$ ,  $K_{1\_üle\_010}$ ,  $K_{võra}$ ,  $K_{alla\_015}$ ,  $K_{asüm\_015\_137}$  ja  $H_{L\_asüm}$ . Tulemused on mõneti ootamatud, sest intuiitiivselt võiks eeldada suuremat hooldusraie vajadust juhul, kui taimestik on tihedam ja maapinnale langeb vähem impulsse. Maapinnani jõudvate impulsside suurem osakaal on seotud suurema hooldusraie vajadusega esiteks põhjusel, et madalates okaspuukultuurides pole puude võrad liitunud ning seetõttu registreeritakse rohkem peegeldusi maapinnalt kui puude võradest. Teiseks, DTM koostamisel võib juhtuda, et tihedalt alustaimestikult saadud peegeldused arvestatakse maapinna osaks (Maa-amet 2021a). Kolmandaks, ALS mõõdistus tehti 2020. aasta kevadel enne vegetatsiooniperioodi, mille tulemusel jõudsid impulsid läbi puittaimestiku hõreda lehtedeta võrastiku maapinnani, kus puudub ka rohttaimestik. Rohttaimestik ja lehtpuude lehtedega võrastikud kajastuvad ALS andmestikus tavaliselt juhul, kui ALS mõõdistuslend on tehtud vegetatsiooniperioodil ehk suvel. Punktipilve kõrguste moodi ja keskväärtusega on seotud meetrikud  $H_{kesk\_015\_137}$ ,  $K_{üle\_moodi}$ ,  $K_{üle\_moodi/1}$ ,  $K_{üle\_kesk}$ ,  $K_{1\_üle\_moodi}$ ,  $K_{üle\_kesk/1}$ ,  $H_{kesk}$ ,  $H_{L1}$ ,  $H_{P80}$ ,  $H_{P90}$  ja  $K_{1\_üle\_kesk}$ . Punktipilve kõrguste keskväärtuse ( $H_{kesk}$ ) ja kõrgusjaotuste 80- ning 90-protsentiilide ( $H_{P80}$ ,  $H_{P90}$ ) tõustes väheneb eraldistel hooldusraie vajadus. Seega kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus on varakevadise ALS mõõdistusandmete põhjal väiksem eraldistel, kus kultiveeritud puud on kõrgemad.

Kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus on kõige enam seotud ( $r = 0,63$ ) ALS meetrikuga  $H_{CV}$  ehk punktipilve kõrguste variatsioonikoefitsiendiga, mis näitab väärtuste hajuvust standardhälbe ja keskväärtuste kaudu. Suurema hajuvuse korral on hooldusraiega kiirem. Kirjeldatud seos on pealtnäha vastuolus meetriku  $H_{sh\_015\_137}$  väärtustega, kuid  $H_{CV}$  arvestab kõiki peegeldusi ja  $H_{sh\_015\_137}$  ainult peegeldusi vahemikus 0,15 kuni 1,37 m.



$H_{sh\_015\_137}$  väiksema väärtuse korral esineb vaadeldud eraldistel suurem kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus ( $r = -0,61$ ), mis võib olla seotud ühtlase tiheda taimeistiku olemasoluga. Viimase puudumisel on punktipilve alumise kihi kõrguste standardhälve suurem ja hooldusraie vajadus väiksem. ALS punktipilve kõrgusjaotuse kuju kirjeldavad L-momendi kõrgusjaotuse ekstsess ( $H_{L\_eksts}$ ) ja kõrgusvahemiku 0,15 – 1,37 m ekstsess ( $H_{015\_137\_eksts}$ ). Mõlema meetriku suurema väärtuse puhul on kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus suurem, mis viitab kõrgusjaotuses olevatele väljalöökidele - need võivad olla põhjustatud näiteks ülekasvanud puudest (tabel 2.3.1).

ALS meetrikud, mis põhinevad kõikide peegelduste või esimeste peegelduste kasutamisel, on kõikidel seoste graafikutel sarnased, sest vaatlusandmestiku eraldiste taimkate on erinevate peegeldusjärgude tekkimiseks liiga madal. Peegeldusjärgude tekkimine sõltub laserskanneri vertikaalsest lahutusvõimest (distsants, millest alates registreerib skanner järgmise peegeldusjärgu), mis on Riegl VQ-1560i laserskanneri puhul üks meeter. Vaatlusandmestiku eraldiste ALS andmete esimesed peegeldused moodustavad kõikidest peegeldusjärgudest keskmiselt 91% ja näiteks teised peegeldused moodustavad ainult 7% kõikidest peegeldusjärgudest.

Mudelite koostamisel lähtuti ALS meetrikute seosest kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadusega ning mudeli argumenttunnuste arvust. Eelistati vähem elemente, sest vaatlusandmestik oli rohkemate argumenttunnuste kasutamiseks liiga väike. Mudelite headust hinnati McFaddeni pseudo-determinatsioonikordajaga  $R^2_m$ , mida kasutatakse logistilisel regressioonanalüüsil. Võrreldes harilikult teadustöodes kasutatava determinatsioonikordajaga  $R^2$ , osutuvad mudelid heaks väiksema  $R^2_m$  väärtuse korral, sest praktikas on keeruline prognoosida binaarset väärtust suure kindlusega (McFadden 1973). Koostatud ja testimiseks välja valitud 12 mudeli statistilised näitajad olid paremad rohkemate argumenttunnustega mudelite puhul (tabel 2.3.2), kuid selline seos viitab mudeli ülesobitamisele. Mudelite headust RMK testandmestikel hinnati prognoositud parameetrite ja nende standardhälvete põhjal. Paremaks arvati mudelid, mis prognoosisid eraldistele väiksema standardhálbega kõrgemaid väärtusi. Testimiseks välja valitud 12 mudelist osutasid paremateks kahe ALS meetriku elemendiga mudel<sub>2</sub> (6) ja kolme ALS meetriku elemendiga mudel<sub>4</sub> (8) ning mudel<sub>5</sub> (9). Nimetatud kolme mudeli argumenttunnuste p-väärtused on alla 0,05 (tabel 2.3.4). Mudelite prognoositud parameetritest olid suurima hajuvusega mudel<sub>10</sub> (14) väärtused. Nimetatud mudel sisaldab viis ALS meetriku elementi, millest üks on statistiliselt ebaoluline (tabel 2.3.4). Mudeli prognoositud väärtuste suurem

dünaamika võib viidata olukorrale, kus eraldistele on järgnevat kaheks aastaks planeeritud kultuuride hooldused ja valgustusraied, kuid ALS andmetel põhineva mudel<sub>10</sub> hinnangul saab osadel eraldistel hooldusraied edasi lükata. Edaspidi võib mudelit mudel<sub>10</sub> kohendada, jättes välja statistiliselt väheolulise parameetri ning lisada ALS meetrikuid, mis põhinevad metsas toimuvate protsesside loogikal.

Mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse prognoosid RMK andmetel jaotati vastavalt väärtustele kolme kategooriasse, misjärel koostati seoste graafikud tabelis 2.3.1 esitatud 24 ALS meetrikuga. Mudelite prognoosid olid suuremas seoses ( $0,51 < |r| < 0,78$ ) seitsme katvust kirjeldava ALS meetrikuga:  $K_{üle\_moodi}$ ,  $K_{alla\_015}$ ,  $K_{üle\_010/1}$ ,  $K_{1\_üle\_010}$ ,  $K_{üle\_010}$ ,  $K_{üle\_moodi/1}$  ja  $K_{1\_üle\_moodi}$ . Loetletud ALS meetrikute väärtused kujutavad suuremat kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadust eraldistel, kus enamik laseri impulsse registreeritakse maapinnalt. Seejuures esineb võimalus, et tihe alustaimestik on maapinna kõrgusmudeli osa. Mudelite prognooside väärtused olid RMK testandmestiku eraldistel sarnased, kõige rohkem prognooside väärtuste kattuvusi eraldistel esines mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> prognooside puhul. RMK 2020. aasta andmestikus oli 47 eraldist, kus kultuuride hooldus ja valgustusraie oli tehtud enne ALS mõõdistuslendu. Nende 47 eraldise mudelite hooldusraie prognoosidest oli 61% väärtusega üks ja umbes 30% prognoosidest väärtusega null. Võrdluseks, peale ALS mõõdistust oli hooldusraie planeeritud 137 eraldisel, kus mudelite prognoosidest keskmiselt 86% oli väärtusega üks ning ligi 10% väärtusega null (tabel 3.1.2). Proportsioonid on erinevad, kuid mudelid prognoosisid väiksemat hooldusraie vajadust eraldistel, kus kultuuride hooldus ja valgustusraie oli ALS mõõdistuse ajaks juba tehtud.

Välivaatlustel hinnati okaspuukultuurides ja -noorendikes, milliseid metsamajanduslikke töid peab tegema järgmise 10 aasta jooksul, kuid praktikas on kultuurides ja noorendikes keeruline prognoosida korraga kõiki 10 aasta jooksul vajaminevaid metsamajanduslikke töid. Alternatiivne lähenemisviis on hinnata lähemate aastate jooksul vajalikke hooldusraieid, mistõttu jaotati välivaatlusel hinnatud eraldised kahte kategooriasse: 1. eraldised, kus on hooldusraiega kiirem ehk kultuuride hoolduse ja valgustusraie peab tegema ühe kuni kolme aasta jooksul (binaarne väärtus üks) ning 2. eraldised, kus saab hooldusraie edasi lükata ehk kultuuride hoolduse ja valgustusraie peab tegema peale kolmandat aastat (binaarne väärtus null). Kategoriseeritud andmete töötlemiseks logistilise regressioonanalüüsi meetodiga lisati eraldistele binaarsed tunnused. Vaatluste vähesuse tõttu rohkem kategooriaid ei tekitatud, kuid tulevastel uuringutel võib katsetada rohkemate

kategooriate kasutamist või pideva funktsioontunnuse kasutamist, näiteks aeg aastates järgmise hooldusraieni.

Andmeanalüüsil ja mudelite koostamiseks kasutati 46 eraldise välivaatluste ja ALS andmeid, kuid usaldusväärsete ja praktikas rakendatavate mudelite koostamiseks on vaja suuremat alusandmestikku. Käesoleva magistritöö välivaatlustel koguti teavet korraga okaspuukultuuride ja -noorendike kohta, mistõttu on järgmistel uuringutel soovitatav koguda andmeid puistu arenguklasside kaupa. Kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamiseks lehtpuukultuurides ja -noorendikes peab mudelite alusandmestiku valimisse kaasama ka lehtpuupuistud. Paremate mudelite koostamiseks võib vaadelda eraldisi, kus esinevad ekstreemumid – hooldusraiet kindlasti vajavad ning mittevajavad eraldised. Samuti tasub andmestikust jätta välja eraldised, kus hooldusraie vajadust on keeruline hinnata.

ALS andmetest meetrikute koostamisel peab arvestama säilikpuudega, mis võivad mõjutada andmeanalüüsi tulemusi. Säilikpuude mõju saab vähendada kasutades kõrgusfiltrit, mis on punkt pilve maksimumkõrgus, millest kõrgemal registreeritud punkte ALS meetrikute koostamisel ei arvestata. Kõrgusfiltri väärtus peab olema kultuuride ja noorendike puistuelemendi keskmisest kõrgusest suurem, et andmeanalüüsi jaoks säiliks vajalikud ALS andmed.

Käesolevas uurimistöös rakendati koostatud mudeleid RMK testandmestikul, mis on kallutatud binaarse väärtuse üks poole. Testandmestiku kallutatuse tõttu ei olnud võimalik koostada ROC-kõverat ega saadud arvutada AUC väärtust, mis on hea statistik hindamaks logistilisel regressioonanalüüsil koostatud mudeleid. Testandmestiku valimisse peab kaasama eraldised, kus kultuuride hooldust ja valgustusraiet pole kindlasti vaja (binaarne väärtus null), seejuures tuleb hooldusraiete vajadused hinnata välivaatlustel. Vähemalt kahe kategooria olemasolul saab mudelite prognooside täpsust hinnata ROC-kõveraga.

Kultuuride hooldust ja valgustusraie vajadust prognoosivad mudelid koostati logistilisel regressioonanalüüsi meetodil, kuid tulevikus võib proovida ka otsustuspuu meetodit. Otsustuspuu meetodil leitakse matemaatilise algoritmiga kindlad tunnused, mis annavad kõige tõenäolisemalt lõpptulemuse. Käesoleva lõputöö kontekstis on leitavad tunnused ALS meetrikud ja lõpptulemus kultuuride ning valgustusraie vajaduse prognoosid eraldistel. Otsustuspuu koostamise eelduseks on suure valimiga alusandmestik. Otsustuspuud kasvatatakse tunnuste lisamise ja otsustusreeglite etteandmisega. Eelnevalt peab analüüsima andmestiku erindeid ja need vajadusel eemaldama (Eriksen jt 2001).

## KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamise võimalusi eraldiste ALS andmete põhjal. Eesmärk oli koostada ALS andmetele tuginevad mudelid, millega saab eraldistel prognoosida hooldusraie vajadust. Välivaatlustel koguti teavet 46 okaspuukultuuri ja -noorendiku kohta ning anti hinnang vajaminevate metsamajanduslike tööde kohta. Maa-ameti 2020. aasta varakevadise ALS mõõdistuslennu lidariandmetest koostati vaadeldud eraldistele ALS meetrikud. Uuriti seoseid kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse ning ALS meetrikute vahel.

Vaadeldud eraldistel on kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus suurem kui enamik lidari emiteeritud impulsse registreeritakse maapinnalt või punktiple kõrguste keskväärtusest madalamal. Maapinnale jõuab suurem osa peegeldusi kevadisel ALS mõõdistuslennul enne vegetatsiooniperioodi, mil lehtpuudel pole lehti ning rohttaimestik praktiliselt puudub. Samuti registreeritakse maapinnalt rohkem peegeldusi juhul, kui madalas okaspuukultuuris pole puude võrad liitunud. Kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadus on enim seotud ( $r = 0,63$ ) ALS meetrikuga  $H_{CV}$  ehk punktiple kõrguste variatsioonikoefitsiendiga, mille suurema väärtuse korral on hooldusraie vajadus vaadeldud eraldistel suurem.

Logistilise regressioonanalüüsi meetodil koostatud mudelite headust hinnati statistiliste parameetrite AIC, pseudo-determinatsioonikordaja  $R^2_m$  ja AUC abil ning kokku tekitati ja valiti välja 12 kultuuride hooldust ja valgustusraiet prognoosivat mudelit, mis sisaldasid argumenttunnustena kaks kuni seitse ALS meetriku elementi. Mudelite testimiseks kasutati RMK 2020. aastal tehtud ning 2021. aastaks planeeritud kultuuride hoolduste ja valgustusraiate andmeid, kokku 450 eraldist. RMK eraldistele tehti mudelitega hooldusraie vajaduse prognoosid ning paremateks osutusid mudelid mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub>, mis prognoosisid eraldistele väiksema standardhälbega keskmiselt kõrgemaid väärtusi. Nimetatud mudelite argumenttunnuste p-väärtused on alla 0,05 ehk mudelid on statistiliselt

olulised. Mudelite mudel<sub>2</sub>, mudel<sub>4</sub> ja mudel<sub>5</sub> rakendamine RMK testandmestikul näitas, et seosed kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse ning ALS meetrikute vahel on olemas. Mudelid prognoosisid hooldusraiet vajavatele RMK eraldistele kõrgemaid väärtusi ning väiksemaid väärtusi prognoositi eraldistele, kus kultuuride hooldus ja valgustusraie oli ALS mõõdistuse ajaks juba tehtud. Seoste uurimist tasub tulevikus jätkata, soovitatav on kasutada vegetatsiooniperioodil tehtud ehk suvise ALS mõõdistuslennu andmeid.

Praktikas rakendatavate ja usaldusväärsete mudelite koostamiseks peab alusandmestik olema mitu korda suurem. Samuti on soovitatav kasutada rohkem kategooriaid (näiteks puistu arenguklasside kaupa) või lisada alusandmestikule pidev funktsioontunnus (aeg aastates järgmise hooldusraieni). Hooldusraie vajaduse hindamiseks lehtpuupuistutes peab valimisse võtma ka lehtpuukultuurid ja -noorendikud. Valideerimisandmestiku puhul on oluline, et valim sisaldaks nii hooldusraiet vajavaid (binaarne väärtus üks) kui ka mittevajavaid eraldisi (binaarne väärtus null), seejuures tuleb raiete vajadused hinnata eraldistel kohapeal ning välja peaks jätma eraldised, kus hooldusraie vajadust on keeruline hinnata. Tulevastel uuringutel võib kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse ning ALS andmete vaheliste seoste leidmiseks ja mudelite koostamiseks kasutada ka otsustuspuu meetodit.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Akaike, H. 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. - IEEE Transactions on Automatic Control 19, 716-723.
2. Arumäe, T. 2020. Puistute takseertunnuste hindamine aerolidari mõõtmisandmete põhjal hemiboreaalsetes metsades. Doktoritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 197 lk.
3. Arumäe, T., Lang, M. 2016. Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga. - Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 64, 5-16.
4. Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., Strahler, A. 2019. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. - Forest Ecology and Management 450.
5. Computer Applications in Sustainable Forest Management. (2006). /Ed. G. Shao, K. M. Reynolds. Dordrecht: Springer. [on-line] [http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/Andersen\\_et\\_al\\_2006\\_PR.pdf](http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/Andersen_et_al_2006_PR.pdf) (04.02.2021)
6. Eriksen, S., Huynh, C., Keller, R. L. (2001). Decision trees. Irvine: Kluwer Academic Publishers. 7 lk.
7. **Heritage, G. L., Large, A. R. G.** (2009). Laser scanning for the environmental sciences. Chichester: Wiley-Blackwell. 288 lk.
8. Kaart, T. (2012). Binaarsete tunnuste analüüsimeetodid. Tartu. 32 lk.
9. Kasischke, E. S., Goetz, S., Hansen, M. C., Ozdogan, M., Rogan, J., Ustin, S. L., Woodcock, C. E. 2004. Temperate and Boreal Forests. - Remote Sensing for Natural Resources Management and Environmental Monitoring: Manual of Remote Sensing 3, 147-238.
10. **Katzenbeisser, R.** (2003). About the calibration of lidar sensors - *ISPRS Workshop "3-D Reconstruction from Airborne Laser-Scanner and InSAR data*. Dresden, Saksamaa, 8.–10.10.2003.
11. **Kiviste, A.** (2007). Matemaatiline statistika *MS Exceli* keskkonnas. Tartu. 86 lk.
12. **Laas, E.** (2001). Metsauuendamine ja metsastamine. Tartu: AS Atlex. 96 lk.
13. **Laas, E.** (2015). Metsakultuuride ja noore metsa hooldamine. Rapla: SA Erametsakeskus. 12 lk.

14. **Laas, E., Uri, V., Valgepea, M.** (2011). Metsamajanduse alused. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. 862 lk.
15. Lang, M. 2010. Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga. - Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 52, 5–17.
16. Lang, M., Anniste, J., Arumäe, T. 2012. Lennukilidari ja spektraalse kaugseireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal. - Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 56, 27–41.
17. Maa-amet. (2021a). Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html> (04.02.2021)
18. Maa-amet. (2021b). ALS III ring. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid/ALS-III-ring-2016-20172020-p625.html> (04.02.2021)
19. Maa-amet. (2021c). Aerolaserskanner Riegl VQ-1560i. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Ortofotod/Tootmislugu/Aerolaserskanner-Riegl-VQ-1560i-p561.html> (04.02.2021)
20. Maa-amet. (2021d). Laadi kõrgusandmed alla. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html> (26.02.2021)
21. Maa-amet. (2021e). Ortofotod. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Ortofotod-p99.html> (21.04.2021)
22. McFadden, D. 1973. Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. - Frontiers in Econometrics, 105–142
23. McGaughey, R. J. 2020. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. September 2020 – FUSION Version 4.10. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
24. Metsanduse programmi projekti nr 15071 aruanne. (2020). Tartu: Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. [https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6239/KIK\\_%20Metsakasvatustlike%20v%C3%B5tete%20rakendamise%20noorendike%20koosseisu%20kujundamisel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6239/KIK_%20Metsakasvatustlike%20v%C3%B5tete%20rakendamise%20noorendike%20koosseisu%20kujundamisel.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (15.02.2021)
25. Metsaseadus. (vastu võetud 07.06.2006, viimati jõustunud 01.01.2021, avaldamismärge: RT I, 10.07.2020, 75). – Riigi Teataja <https://www.riigiteataja.ee/akt/MS> (01.02.2021)
26. Naesset, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. - ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52, 49-56.

27. **Pihlak, M.** (2018). Klassikaline ja mitteparameetriline statistika. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 289 lk.
28. QGIS. (2021). QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System. [veebileht] <https://qgis.org/en/site/> (15.03.2021)
29. Riegl. (2021). RIEGL VQ-1560i datasheet. [veebileht] [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/RIEGL\\_VQ-1560i\\_Datasheet\\_2019-09-02.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-1560i_Datasheet_2019-09-02.pdf) (30.05.2021)
30. RMK aastaraamat 2019. (2020). /Koost. K. Ratassepp. Tartu: Ecoprint AS. 35 lk.
31. RMK. (2020). RMK alustab rekordiliselt suure metsaistutusega 02.04. [veebileht] <https://www.rmke.ee/organisatsioon/pressiruum/uudised/uudised-2020/rmk-alustab-rekordiliselt-suure-metsaistutusega> (20.04.2021)
32. R-project. (2021). The R Project for Statistical Computing. [veebileht] <https://www.r-project.org/> (16.03.2021)
33. SA Erametsakeskus. (2020). Metsa uuendamiseks küsiti toetust enam kui 1,6 miljonit eurot. [veebileht] <https://www.eramets.ee/metsandusuudised/metsa-uuendamiseks-kusiti-kaks-korda-enam-raha-kui-on-vahendeid/> (20.04.2021)
34. **Vaus, M.** (2005). Metsatakseerimine. Tartu: OÜ Halo Kirjastus. 178 lk.



**LISAD**

**Lisa 1.** Pildid vaadeldud eraldistest

Eraldis nr 1



Eraldis nr 2



Eraldis nr 3



Eraldis nr 4



Eraldis nr 5



Eraldis nr 6



Eraldis nr 7



Eraldis nr 8





## Lisa 1 järg

Eraldis nr 9



Eraldis nr 10



Eraldis nr 11



Eraldis nr 12



Eraldis nr 13



Eraldis nr 14



Eraldis nr 15



Eraldis nr 16





## Lisa 1 järg

Eraldis nr 17



Eraldis nr 18



Eraldis nr 19



Eraldis nr 20



Eraldis nr 21



Eraldis nr 22



Eraldis nr 23



Eraldis nr 24





## Lisa 1 järg

Eraldis nr 25



Eraldis nr 26



Eraldis nr 27



Eraldis nr 28



Eraldis nr 29



Eraldis nr 30



Eraldis nr 31



Eraldis nr 32





## Lisa 1 järg

Eraldis nr 33



Eraldis nr 34



Eraldis nr 35



Eraldis nr 36



Eraldis nr 37



Eraldis nr 38



Eraldis nr 39



Eraldis nr 40





## Lisa 1 järg

Eraldis nr 41



Eraldis nr 42



Eraldis nr 43



Eraldis nr 44



Eraldis nr 45



Eraldis nr 46



**Lisa 2.** Vaadeldud eraldiste vaatlusandmed, vajalike tööde kirjeldused ning lisatud binaarsed tunnused üks ja null

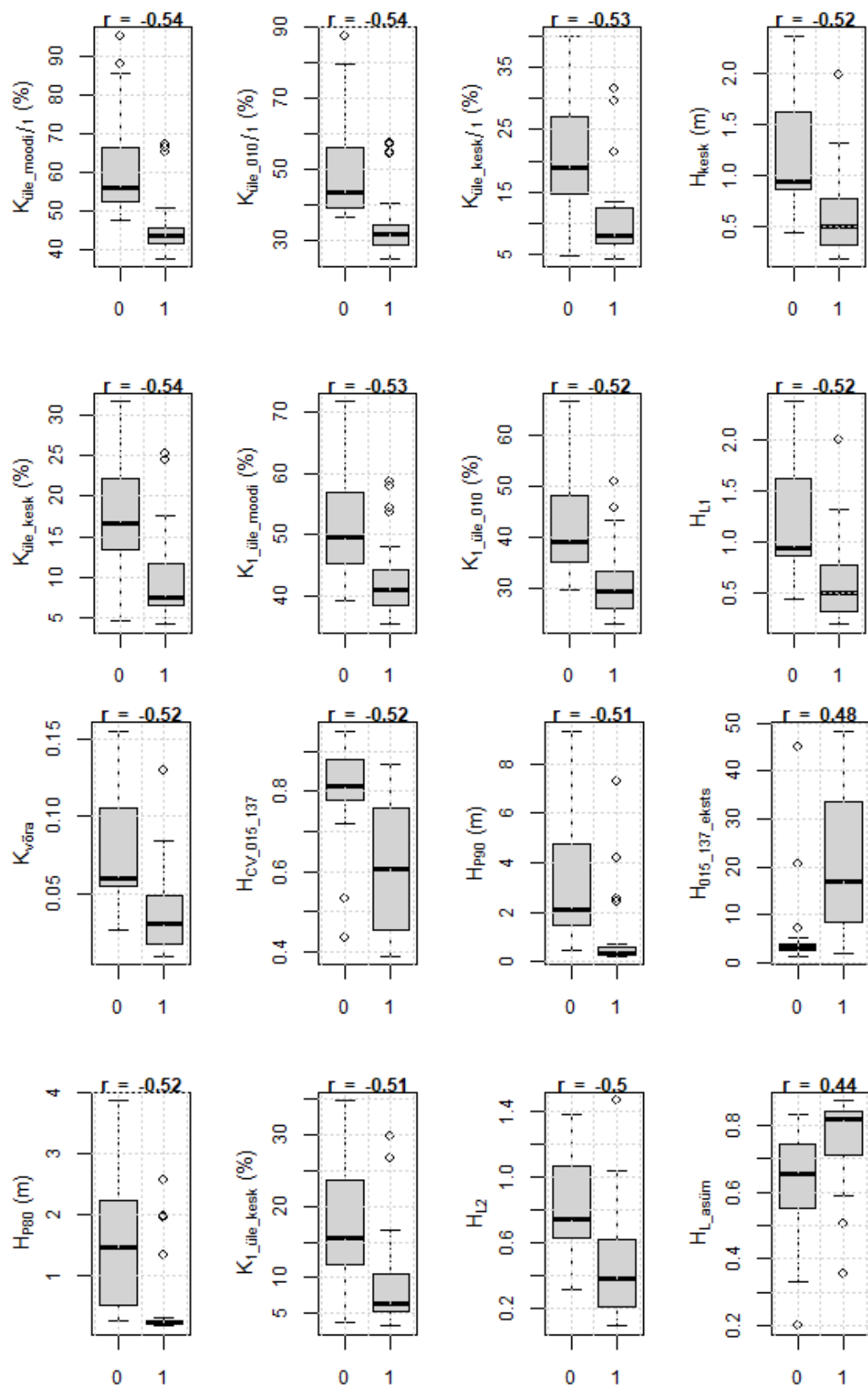
NR	PL1	PL2	PL3	A1	A2	A3	H1	H2	H3	D1	D2	D3	VAJALIKUD_TOOD	HINNANG10
1	KU	-	-	7	-	-	3	-	-	3	-	-	pole vaja, KU on rohurindest kõrgem; konkureerivaid lehtpuid pole	0
2	KU	KS	-	10	5	-	7	8	-	6	8	-	järgmine vajalik töö on HR, KS ja KU kasvavad kohati väga lähestikku	0
3	KU	KS	MA	5	5	5	1.5	2	1	1	-	-	kultiveeritud KU-st kõrgemate lehtpuude lõikamine 1-2 a jooksul	1
4	MA	KS	KU	8	8	8	2	2	0.5	2	1	-	kultiveeritud MA-ga sama kõrgete lehtpuude lõikamine koos MA harvendamisega	1
5	MA	KS	-	12	-	-	4	9	-	5	6	-	pole vaja, MA on rohurindest ja konkureerivast lehtpuust kõrgem	0
6	MA	KS	KU	7	-	-	1.5	2	1	1	2	-	MA-st kõrgema KS harvendamine, madalama KU harvendamine	1
7	MA	-	-	2	-	-	0.4	-	-	-	-	-	kultiveeritud MA-st kõrgema rohu niitmine	1
8	KU	-	-	2	-	-	0.3	-	-	-	-	-	kultiveeritud KU-st kõrgema rohu niitmine	1
9	KU	-	-	12	-	-	4	-	-	5	-	-	pole vaja, KU on rohurindest ja vaarikast kõrgem	0
10	MA	KS	-	10	2	-	2	1	-	2	-	-	5 a jooksul pole vaja, hiljem KS lõikamine koos MA harvendamisega	0
11	MA	-	-	2	-	-	0.4	-	-	-	-	-	rohu niitmine ja kõrgema lehtpuu lõikamine	1
12	MA	KS	HB	10	5	3	3	3	3	5	2	1	MA-ga sama kõrge ja kõrgema lehtpuu lõikamine	1
13	MA	MA	-	3	-	-	0.4	0.1	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuu lõikamine	1
14	MA	KS	KU	6	3	6	1.5	2	1.5	1	1	-	MA-ga sama kõrge lehtpuu lõikamine	1
15	MA	TA	-	7	9	-	2	2	-	2	2	-	MA-ga sama kõrge lehtpuu lõikamine	1
16	KU	MA	TA	9	7	10	3	3	5	3	3	4	lehtpuude lõikamine 3 a pärast	0
17	KU	-	-	8	-	-	1.5	-	-	1	-	-	KU-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuude lõikamine	1
18	KU	-	-	4	-	-	0.5	-	-	-	-	-	KU-st kõrgema rohu niitmine	1
19	MA	-	-	4	-	-	0.5	-	-	-	-	-	3 a jooksul pole vaja, konkureeriv lehtpuu ja rohurinne puudub	0
20	KU	-	-	7	-	-	0.4	-	-	-	-	-	rohu niitmine, täiendamine avajuurse KU-ga	1
21	MA	KS	-	11	-	-	4	2	-	4	-	-	pole vaja, lehtpuu ei sega MA kasvu	0
22	KU	MA	-	6	3	-	1	0.5	-	-	-	-	KU-st kõrgema rohu niitmine	1
23	KU	-	-	7	-	-	1.5	-	-	1	-	-	KU-st kõrgema lehtpuu lõikamine	1
24	MA	-	-	11	-	-	5	-	-	5	-	-	MA-ga sama kõrgete ja madalamate lehtpuude lõikamine ja MA harvendamine	1
25	MA	KU	-	8	10	-	2	5	-	1	5	-	pole vaja, MA on lehtpuudest kõrgem, 3 a pärast lehtpuu lõikamine	0



NR	PL1	PL2	PL3	A1	A2	A3	H1	H2	H3	D1	D2	D3	VAJALIKUD_TOOD	HINNANG10
26	KU	MA	-	12	6	-	3	2	-	3	2	-	pole vaja, KU on rohust ja lehtpuudest kõrgem	0
27	MA	-	-	3	-	-	0.4	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuu lõikamine	1
28	MA	-	-	4	-	-	0.5	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuu lõikamine	1
29	KU	MA	-	13	13	-	5	5	-	6	5	-	pole vaja, lehtpuu ei sega MA ja KU kasvu	0
30	KU	-	-	4	-	-	0.4	-	-	-	-	-	KU-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuude lõikamine	1
31	KU	MA	-	7	2	-	0.6	0.2	-	-	-	-	KU-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuude lõikamine	1
32	MA	KS	-	9	9	-	2	3	-	2	2	-	KS ja teiste lehtpuude lõikamine	1
33	MA	KS	-	9	6	-	2	2	-	1	1	-	MA-st kõrgema lehtpuu lõikamine ja MA harvendamine	1
34	MA	-	-	3	-	-	0.3	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine	1
35	MA	KS	-	10	6	-	3	3	-	3	2	-	pole vaja, MA on rohurindest kõrgem, KS ei sega MA kasvu	0
36	MA	-	-	3	-	-	0.4	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuude lõikamine	1
37	MA	-	-	3	-	-	0.4	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine ja lehtpuude lõikamine	1
38	MA	-	-	10	-	-	4	-	-	6	-	-	MA harvendamine 3 a pärast	0
39	KU	HB	KS	10	8	8	4	4	4	5	3	3	KU-ga sama kõrgete ja kõrgemate lehtpuude lõikamine ja KU harvendamine	1
40	KU	-	-	9	-	-	3	-	-	3	-	-	KU-ga sama kõrgete lehtpuude lõikamine	1
41	KU	KS	-	14	-	-	7	7	-	7	6	-	pole vaja, KS harvendamine 5 a pärast	0
42	MA	-	-	7	-	-	1.3	-	-	1	-	-	pole vaja, 3 a pärast lehtpuude lõikamine	0
43	MA	-	-	4	-	-	0.4	-	-	-	-	-	MA-st kõrgema rohu niitmine, MA täiendamine	1
44	KU	-	-	13	-	-	6	-	-	6	-	-	pole vaja, harvendamine 7 a pärast	0
45	MA	-	-	12	-	-	4	-	-	4	-	-	pole vaja, MA harvendamine 5 a pärast	0
46	KU	-	-	15	-	-	9	-	-	10	-	-	pole vaja	0

Märkused: NR – vaadeldud eraldise järjekorranumber; PL1,PL2,PL3 – puistuelemendi puuliik (KU – harilik kuusk, KS – arukask/sookask, MA – harilik mänd, HB – harilik haab, TA – harilik tamm); A1, A2, A3 – puistuelemendi keskmine vanus (a); H1, H2, H3 – puistuelemendi keskmine kõrgus (m); D1, D2, D3 – puistuelemendi keskmine rinnasdiameeter (cm); VAJALIKUD\_TOOD – eraldisel vajalike metsamajanduslike tööde kirjeldus; HINNANG10 – lisatud binaarne tunnus üks (raie teha ühe kuni kolme aasta jooksul) ja null (raie teha peale kolmandat aastat)

**Lisa 3.** Vaadeldud eraldiste ALS meetrikute korrelatsioonid kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajadusega



Märkus. Väärtuse null (n=18) puhul tuleb raie teha peale kolmandat aastat ja väärtuse üks (n=28) korral ühe kuni kolme aasta jooksul

**Lisa 4.** Vaadeldud eraldiste ALS meetrikute statistilised näitajad

<sup>1</sup> TÄHIS	<sup>2</sup> ÜHIK	<sup>3</sup> KESK	<sup>4</sup> MIN	<sup>5</sup> MAX	<sup>6</sup> S_HÄLVE
H <sub>CV</sub>		2.80	0.92	4.25	0.88
H <sub>sh_015_137</sub>	m	0.25	0.09	0.45	0.12
H <sub>kesk_015_137</sub>	m	0.35	0.22	0.63	0.11
H <sub>L_eksts</sub>		0.53	0.00	0.77	0.21
K <sub>üle_moodi</sub>	%	46.77	36.11	69.82	7.88
K <sub>üle_010</sub>	%	36.25	23.78	64.10	9.41
K <sub>alla_015</sub>		0.73	0.41	0.85	0.11
K <sub>asüm_015_137</sub>		2.60	0.36	5.29	1.45
K <sub>üle_moodi/1</sub>	%	52.43	37.89	95.33	13.27
K <sub>üle_kesk</sub>	%	12.78	4.13	31.67	7.18
K <sub>üle_010/1</sub>	%	40.89	24.96	87.51	14.34
K <sub>1_üle_moodi</sub>	%	46.57	35.30	71.69	8.76
K <sub>üle_kesk/1</sub>	%	14.74	4.31	40.16	9.61
K <sub>1_üle_010</sub>	%	35.99	22.85	66.41	10.46
H <sub>kesk</sub>	m	0.83	0.19	2.38	0.56
H <sub>L1</sub>		0.83	0.19	2.38	0.56
K <sub>võra</sub>		0.05	0.01	0.16	0.04
H <sub>P80</sub>	m	0.90	0.17	3.86	1.05
H <sub>CV_015_137</sub>		0.69	0.39	0.95	0.17
K <sub>1_üle_kesk</sub>	%	12.22	3.26	34.65	8.40
H <sub>P90</sub>	m	1.78	0.24	9.33	2.17
H <sub>L2</sub>		0.59	0.09	1.46	0.36
H <sub>015_137_eksts</sub>		14.93	1.40	48.46	14.09
H <sub>L_asüm</sub>		0.70	0.20	0.87	0.16

Märkused:

<sup>1</sup>TÄHIS – ALS meetriku tähis;

<sup>2</sup>ÜHIK – meetriku ühik;

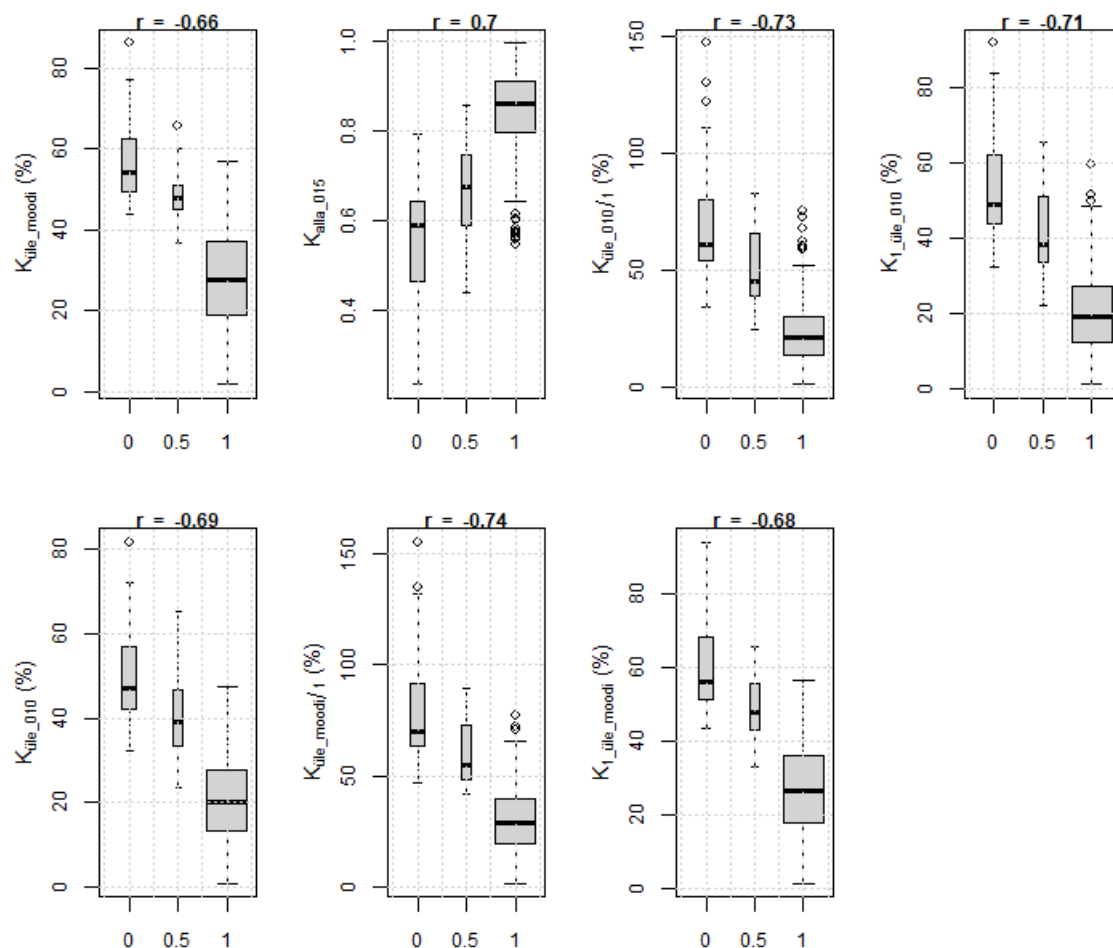
<sup>3</sup>KESK – meetriku keskväärtus;

<sup>4</sup>MIN – meetriku minimaalne väärtus;

<sup>5</sup>MAX – meetriku maksimaalne väärtus;

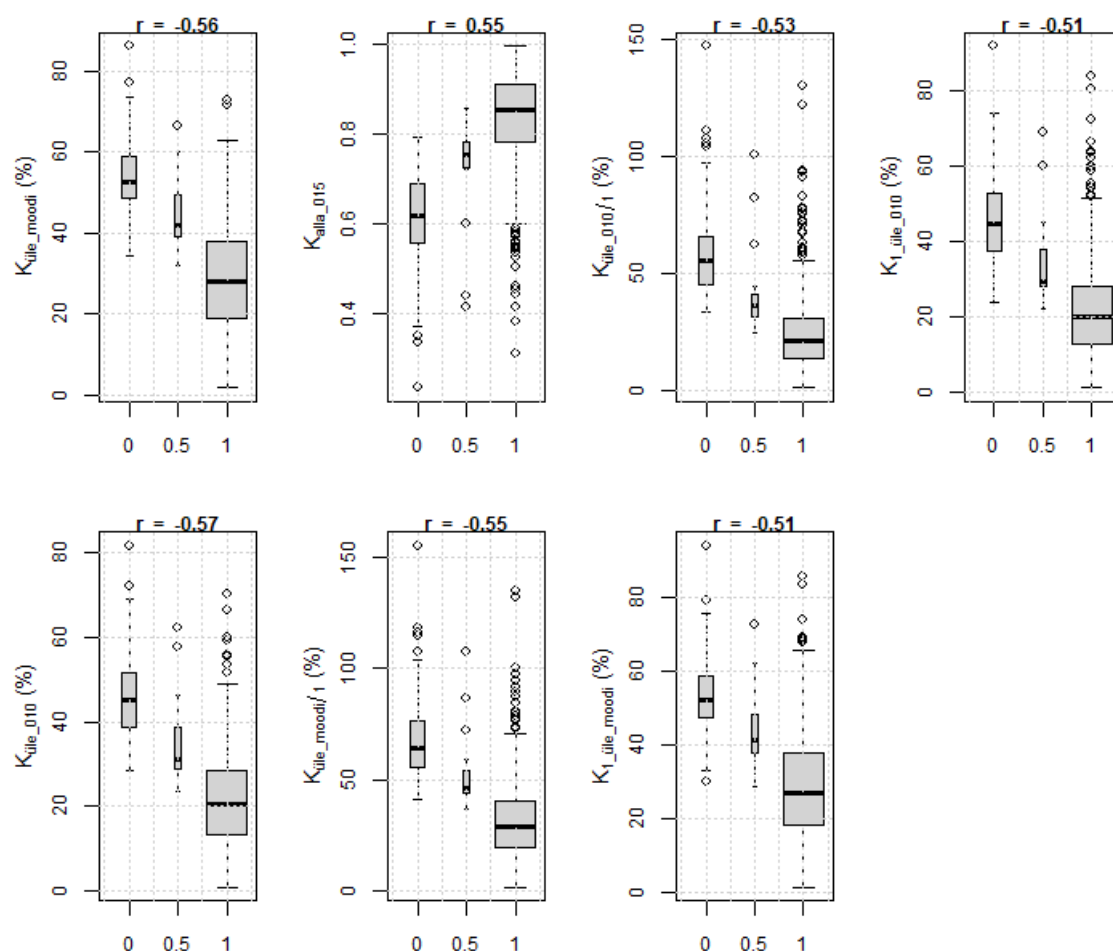
<sup>6</sup>S\_HÄLVE – meetriku standardhälve.

**Lisa 5.** Model<sub>2</sub>, model<sub>4</sub> ja model<sub>5</sub> hooldusraie vajaduse prognooside ja ALS meetrikute seoste graafikud RMK 2021. aasta andmete põhjal



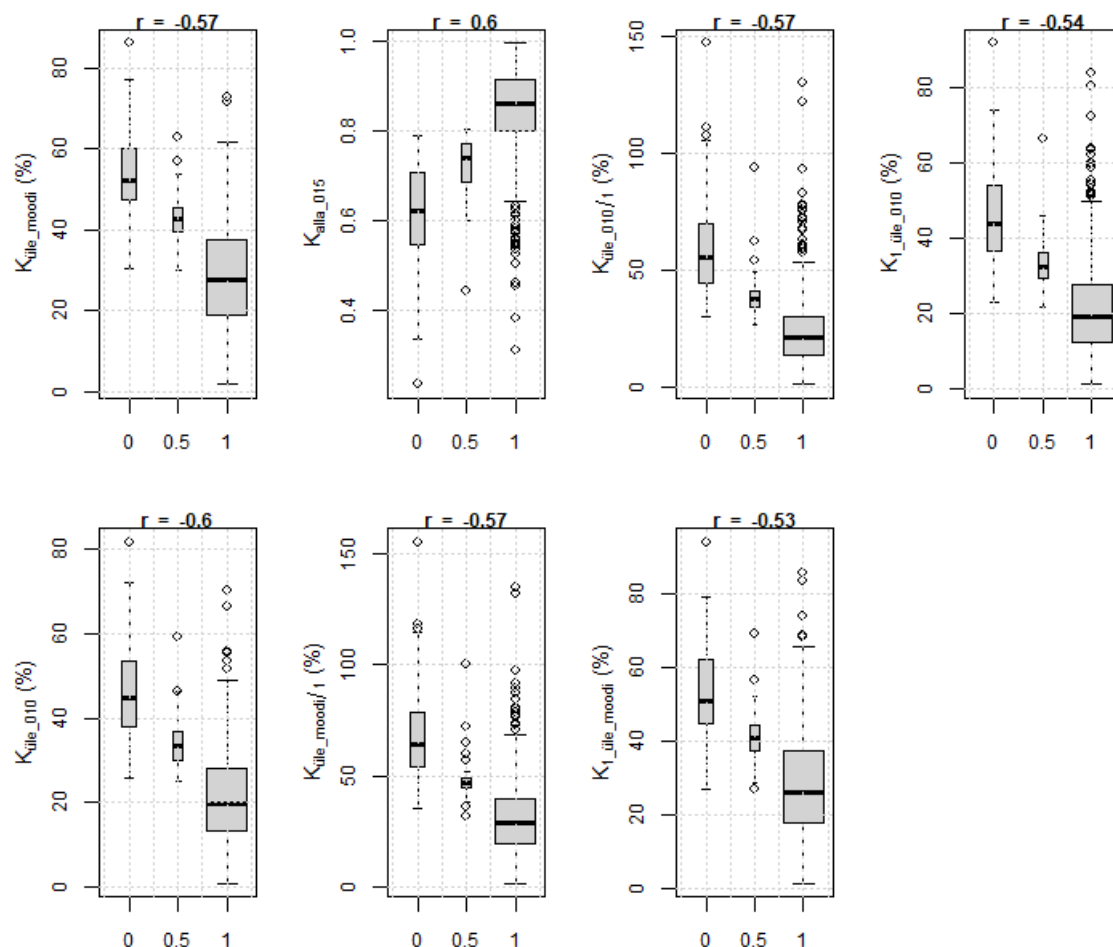
**Joonis 5.1.** Model<sub>2</sub> prognooside korrelatsioonid seitsme ALS meetrikuga RMK 2021. aasta andmetel. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat (n=25), väärtuse üks korral tuleb hooldusraie teha ühe kuni kolme aasta jooksul (n=226), väärtuse 0,5 puhul peab hooldusraie vajaduse looduses kohapeal hindama (n=15)

## Lisa 5 järg



**Joonis 5.2.** Mudel<sub>4</sub> prognooside korrelatsioonid seitsme ALS meetrikuga RMK 2021. a andmetel. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat (n=28), väärtuse üks korral tuleb hooldusraie teha ühe kuni kolme aasta jooksul (n=133), väärtuse 0,5 puhul peab hooldusraie vajaduse looduses kohapeal hindama (n=6)

## Lisa 5 järg



**Joonis 5.3.** Mudel<sub>5</sub> prognooside korrelatsioonid seitsme ALS meetrikuga RMK 2021. a andmetel. Väärtuse null korral tuleb kultuuride hooldus ja valgustusraie teha peale kolmandat aastat (n=30), väärtuse üks korral tuleb hooldusraie teha ühe kuni kolme aasta jooksul (n=226), väärtuse 0,5 puhul peab hooldusraie vajaduse looduses kohapeal hindama (n=10)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Feliks Sirkas,

(*autori nimi*)

sünniaeg 19.05.1996,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „kultuuride hoolduse ja valgustusraie vajaduse hindamine aerolidari andmete põhjal“,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Mait Lang,

(*juhendaja(te) nimi*)

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,  
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja  
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;  
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;  
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)